INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
REGRESAR A VENUS | ENFERMEDADES AUTOINMUNITARIAS | EL CEREBRO ELÉCTRICO
NOVIEMBRE 2021 N.º 542

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Noviembre 2021 • N.º 542 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

REGRESAR A VENUS

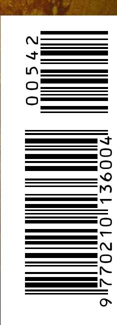
Tres nuevas misiones explorarán el olvidado gemelo infernal de la Tierra



CONSERVACIÓN
Un ambicioso plan para salvar al puma

NEUROCIENCIA
La topografía de la experiencia consciente

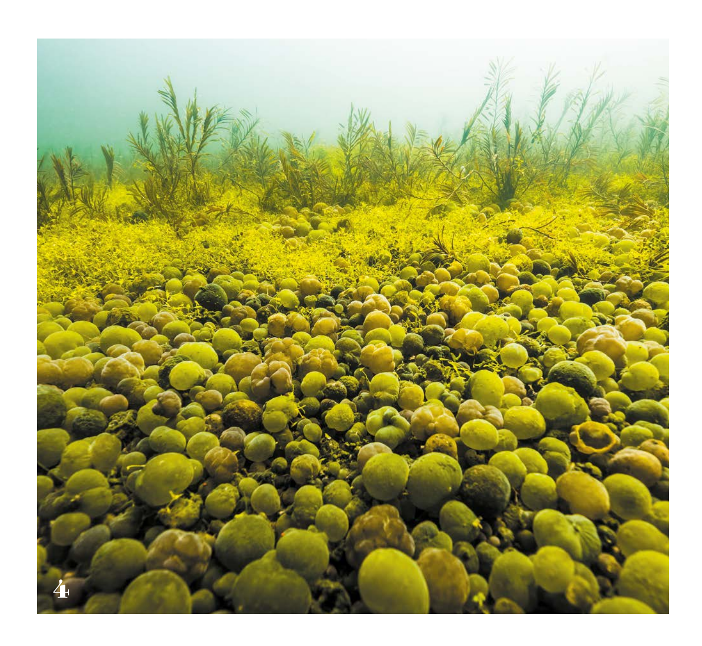
COSMOLOGÍA
¿Falla algo en los fundamentos del modelo cosmológico?



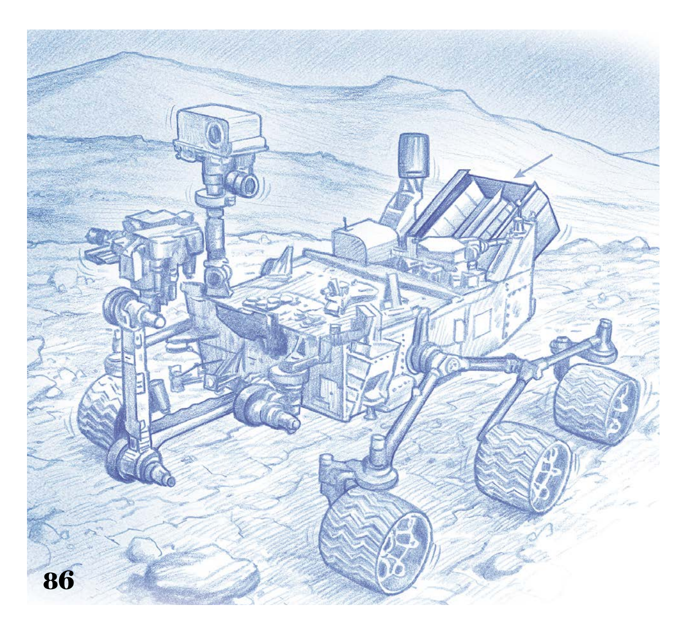


SERVICIO DE PARQUES NACIONALES

ARTÍCULOS


4


48


86

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Durante la próxima década, una misión de la ESA y dos de la NASA llegarán a nuestro largamente olvidado planeta vecino. Sus objetivos serán averiguar cómo llegó Venus a convertirse en la versión infernal de la Tierra que es en la actualidad, si fue habitable o no en el pasado, y qué consecuencias podrían derivarse de todo ello para evaluar la posible existencia de vida en los mundos que orbitan en torno a otras estrellas. Imagen de NASA y JPL



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2021

WEINBERG ATEO

En el artículo «El soñador de la teoría final» [Investigación y Ciencia, octubre de 2021], Miguel Á. Vázquez-Mozo nos presenta un elogioso perfil profesional y personal de Steven Weinberg, el recientemente fallecido científico de Nueva York



ganador del Nobel de física de 1979. Weinberg se merece sin duda alguna todos esos elogios.

Lamentablemente, a mi modo de ver, en el texto el autor no hace mención alguna a un aspecto personal muy importante para el propio Weinberg, el cual sí ha sido recogido en numerosos artículos publicados sobre él tras su muerte y que me gustaría resaltar: su ateísmo.

Weinberg fue un ateo convencido y militante. Dedicó una parte importante de su tiempo a dar conferencias, publicar artículos y participar en debates para dar a conocer y para justificar la racionalidad que soportaba su ateísmo y las consecuencias, muchas veces devastadoras, de la religión. En cierta ocasión dijo: «Con religión o sin ella, la gente buena puede comportarse bien y la gente mala puede hacer el mal; pero para que la gente buena haga el mal, hace falta la religión».

Steven Weinberg defendió y justificó su posición valientemente, sobre todo si se tiene en cuenta la influencia de la religión en su país natal, Estados Unidos.

Miquel Payaró
Barcelona

LA NEUTRALIDAD EN CIENCIA

En el artículo de Naomi Oreskes «¿Debe ser neutral la ciencia?» [Investigación y Ciencia, septiembre 2021] se discute la necesidad de que los científicos reconozcan sus valores y acepten que estos orientan sus investigaciones, huyendo de una neutralidad valorativa que aparentemente les aleja de la confianza pública.

Aunque estoy de acuerdo con la propuesta, creo que se obvia una cuestión importante relativa no tanto al sesgo científico como al obligado control que la sociedad debe ejercer sobre el avance científico. Muchos creemos que la investigación descontrolada en, por ejemplo, inteligencia artificial o edición genética conlleva dos peligros más reales que potenciales, bastante alejados de esa mencionada neutralidad valorativa. Es evidente que, históricamente, la reglamentación ética que debe moderar toda investigación ha ido retrasada con respecto a los hallazgos científicos. A mi juicio, la pregunta relevante no es si la ciencia debe ser neutral (la observación estricta del método científico ya mitiga suficientemente los sesgos), sino si nos podemos permitir que la ciencia avance sin un control ético preestablecido.

Aunque actualmente parece existir una cierta moratoria en el uso indiscriminado de las modernas herramientas de edición genética, resulta ciertamente inquietante anticipar en qué se va a traducir el ingente esfuerzo que miles de mentes brillantes llevan realizando desde hace un par de décadas en el campo de la inteligencia artificial y de los algoritmos de forma opaca y no supervisada.

Pedro David Delgado López
Hospital Universitario de Burgos
Presidente de la Sociedad Castellanoleonesa de Neurocirugía



Octubre 2021

Erratum corrige

En la sección Hace 50, 100 y 150 años [Investigación y Ciencia, septiembre de 2021], el pie de la figura describe un ferri de 12,7 metros de eslora, cuando debería indicar 42,7 metros. Agradecemos a Andrés Martínez por habernos advertido del error.

Esta errata ha sido enmendada en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Cianobacterias en el lago Yellowstone, en Wyoming. Las especies primitivas de estos microorganismos ayudaron a llenar de oxígeno la atmósfera terrestre a través de la fotosíntesis.




JENNIFER IDOL/STOCKTREK IMAGES/GETTY IMAGES

HISTORIA DE LA TIERRA

¿Cómo se oxigenó nuestro planeta?

Los cambios en la rotación de la Tierra podrían haber influido en la acumulación de oxígeno en la atmósfera

Cuando Judith Klatt comenzó a estudiar los coloridos tapices de microorganismos primitivos presentes en un sumidero del fondo del lago Hurón, entre EE.UU. y Canadá, pensó que podría aprender algo sobre los primeros ecosistemas de la Tierra. En cambio, Klatt, biogeoquímica del Instituto Max Planck de Microbiología Marina de Bremen, acabó enfrentándose a uno de los mayores misterios de la geología: ¿cómo se convirtió la Tierra en el único planeta conocido con una atmósfera rica en oxígeno?

Los indicios geológicos sugieren que los microbios podrían haber empezado a liberar oxígeno a través de la fotosíntesis hace 3000 millones de años o incluso antes. Pero, por algún motivo, ese oxígeno tardó unos 500 millones de años en acumularse en la atmósfera, y otros 1000 millones de años más en alcanzar las concentraciones actuales y crear el marco idóneo para la vida compleja. Esos retrasos siempre han desconcertado a los científicos. Algunos creen que se produjeron reacciones químicas que consumieron gran parte del gas, o que la falta de nutrientes esenciales limitó su producción.

Ahora, inspirados por el estudio del sumidero, Klatt y sus colaboradores han hallado otra posible explicación: puede que los primeros días de la Tierra simplemente fueran demasiado cortos. La propuesta se publica en *Nature Geoscience*.

Al poco de formarse el sistema solar, un objeto del tamaño de Marte chocó contra la Tierra y generó una nube de escombros que dieron lugar a la Luna. Desde entonces, el arrastre de nuestro satélite natural ha ido frenando la rotación del planeta, con lo que los días han pasado de durar unas 6 horas en la Tierra joven a las 24 horas actuales. Los científicos conocen esa ralentización desde hace décadas y continúan puliendo los deta-

lles. Pero pocos la habían relacionado con los niveles de oxígeno, hasta que el oceanógrafo de la Universidad de Míchigan Brian Arbic escuchó una charla sobre el trabajo de Klatt en el sumidero del lago Hurón. Arbic, coautor del nuevo estudio, se preguntó si el cambio en la duración de los días podría haber influido en la fotosíntesis a lo largo del tiempo geológico.

El sumidero recibe aguas subterráneas pobres en oxígeno y ricas en azufre, por lo que recrea las condiciones de la Tierra primitiva y alberga comunidades de bacterias que recubren el fondo del lago con tapices morados y blancos. Klatt y su equipo observaron cómo, durante la noche, las cianobacterias fotosintéticas se escondían bajo otras competidoras consumidoras de azufre, mientras que al amanecer ambos microorganismos volvían a intercambiar sus posiciones. Los investigadores hallaron que el tiempo que tardaban en completar esa permuta creaba un desfase entre la salida del sol y el momento en que la fotosíntesis cobra impulso, y que eso limitaba la cantidad de oxígeno que producían los tapices en los días cortos. De hecho, Klatt demostró en el laboratorio que los tapices no generaban nada de oxígeno en «días» artificiales de 12 horas, y que la producción aumentaba con la duración del día a partir de las 16 horas.

Al principio, Klatt dudó de que los resultados del sumidero pudieran ayudar a explicar el misterio del oxígeno. «Se trata de un tipo de comunidad muy especial que quizás no existiera en la Tierra primitiva», señala. Y sin esa competencia, los cambios en la duración de los días serían intrascendentes, porque los microorganismos recibirían la misma cantidad total de luz solar, solo que a intervalos distintos. Pero luego, y tras pensarlo durante lo que considera un tiempo «vergonzosamente largo», Klatt se percató de que había una conexión aún más básica que afectaría a cualquier tapiz bacteriano, incluidos los de la Tierra primitiva: aunque la producción de oxígeno se mantuviera constante, los días más largos permitirían que pasara más gas al agua y, en última instancia, a la atmósfera.

La razón se debe a que el volumen de oxígeno que libera un tapiz está limitado por la rapidez con que las moléculas del gas pueden difundirse fuera de él, así como por la cantidad que consumen otros tipos de bacterias presentes. Los días más largos poseen un pico prolongado de luz solar, y eso permite que se acumule más oxígeno en el tapiz, con lo que aumenta la difusión. Y otro detalle crucial: si los días son más largos, el gas tiene más tiempo para escapar antes de que anochezca, cuando los microorganismos que precisan oxígeno acaban con el resto. Según los modelos de los autores, estos mecanismos podrían haber tenido una gran repercusión en los niveles de oxígeno atmosférico a lo largo de la historia de la Tierra.

«Es una idea simple pero elegante», valora Timothy Lyons, biogeoquímico de la Universidad de California en Riverside ajeno al estudio. Lyons subraya que aún persisten grandes incógnitas, como si las primeras bacterias fotosintéticas vivían en el fondo marino o flotaban libres en el agua, donde podrían haber liberado oxígeno con más facilidad y sin depender tanto de la difusión. El investigador sospecha que muchos procesos conspiraron para colmar la atmósfera de oxígeno, pero que la duración de los días sin duda podría haber contribuido.

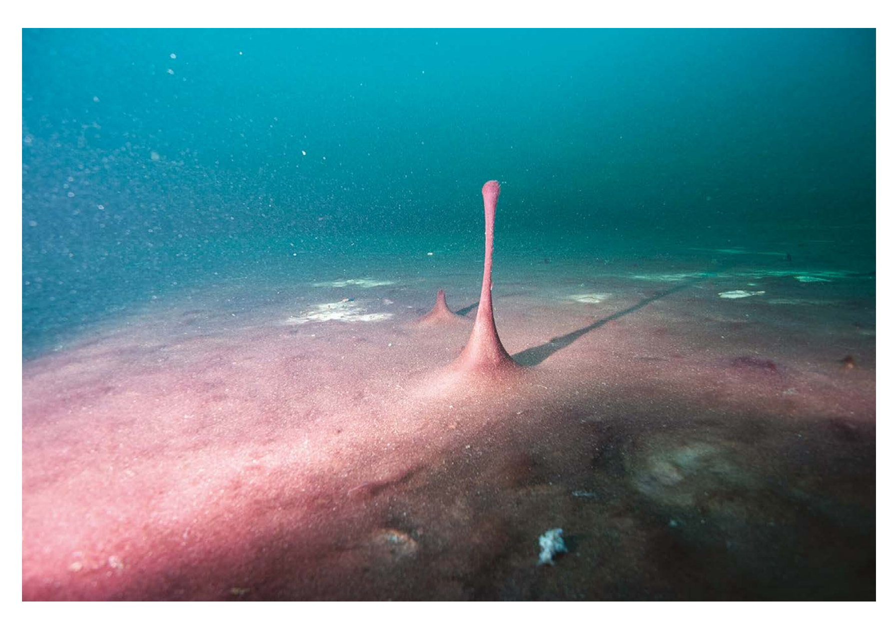
Otros posibles mecanismos son los cambios en las emisiones de gases volcánicos que reaccionan con el oxígeno, como el hidrógeno y el metano, y la escasez de fósforo, un nutriente esencial para la fotosíntesis. A Benjamin Mills, que modeliza la evolución de la Tierra en la Universidad de Leeds y que no tomó parte en el estudio, le sorprende que los científicos hubieran pasado por alto el papel de la duración de los días. El reto ahora, afirma, es evaluar «la importancia relativa de ese proceso dentro del ciclo global del oxígeno».

Tanto Mills como Stephanie Olson, astrobióloga de la Universidad Purdue que tampoco participó en el trabajo, quedaron impresionados por lo bien que concuerdan los nuevos resultados con la historia de la oxigenación atmosférica. Eso incluye el famoso aumento en dos etapas y los «1000 millones de años aburridos» intermedios, cuando la concentración de oxígeno se estabilizó y la duración de los días también se estancó en 21 horas. «Es interesante que la acumulación de oxígeno y la ralentización de la rotación de la Tierra parezcan haber ido a la par», destaca Olson.

Olson es una de las pocas investigadoras que han propuesto una conexión entre la duración de los días y los niveles de oxígeno. En un artículo de 2020 centrado en los exoplanetas, planteó que los cambios en la rotación de la Tierra a lo largo del tiempo podrían haber afectado a la circulación de los océanos y, con ello, al transporte de los nutrientes que impulsan la fotosíntesis, como el fósforo. Olson y sus estudiantes están explorando esa idea con modelos informáticos. Este mecanismo podría haber actuado a la vez que el de Klatt, aclara Olson. «No me parecen ideas opuestas, sino muy complementarias.»

La posible conexión entre la rotación de la Tierra y el oxígeno atmosférico sigue asombrando a Arjun Chennu, ecólogo del Centro Leibniz de Investigación Marina Tropical de Bremen que dirigió el estudio junto a Klatt. Desde el movimiento de los planetas hasta el de las moléculas, concluye, «el abanico de escalas donde influyen estas interacciones es increíble».

—Julia Rosen



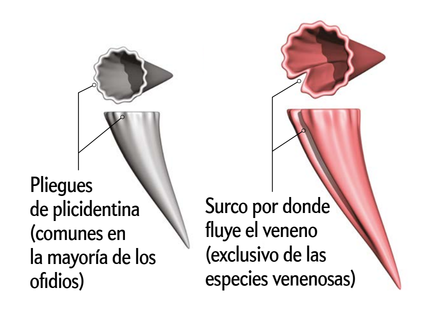
Emisión de gas en un tapiz bacteriano presente en un sumidero del lago Hurón. Las cianobacterias del tapiz se disputan el espacio con otros microbios que consumen azufre.

PHIL HARTMEYER Y SANTUARIO MARINO NACIONAL DE THUNDER BAY DE LA NOAA

EVOLUCIÓN

Mordedura de serpiente

Se demuestra la evolución de los colmillos especializados en inyectar veneno




Cráneo de una víbora del Gabón armado de colmillos prominentes.

El mundo alberga cientos de serpientes venenosas de aspecto radicalmente distinto, desde las llamativas corales listadas hasta los crípticos mocasines. De algún modo, hasta las especies más alejadas entre sí adquirieron colmillos especializados provistos de surcos por los que circula el veneno, una incógnita duradera que nuevas investigaciones podrían haber resuelto. Según Alessandro Palci, herpetólogo de la Universidad Flinders, en Adelaida, la respuesta ha permanecido oculta en la cavidad bucal de estos reptiles durante todo este tiempo.

Resulta que los dientes de la mayoría de los ofidios poseen un anillo de hendiduras diminutas en torno a la base, describen Palci y los demás autores del estudio en *Proceedings of the Royal Society B*. Ese tejido dental picado, denominado plicidentina, ayuda a fijar las piezas a las mandíbulas. «Antes de nuestro trabajo se pensaba que la plicidentina solo estaba presente en tres tipos de lagartos actuales», aclara Palci. Según el estudio, en realidad parece ser ubicuo en las serpientes.

Y esos anclajes dentales han adoptado otra función en las especies venenosas, afirman los investigadores. Mediante la observación de muestras de tejido al microscopio y microtomografías dentales han averiguado que, en los dientes adyacentes a las glándulas de veneno, los pliegues de plicidentina se han convertido en largas acanaladuras que ayudan a que el veneno fluya desde la glándula al colmillo y de este a la presa.

Este descubrimiento indica que las actuales serpientes venenosas no tuvieron que comenzar de cero para adquirir una mordedura mortal. Palci destaca que son muchas las que producen saliva tóxica y que los dientes provistos de surcos muy pronunciados de plicidentina facilitan que el veneno segregado fluya con más rapidez. La reiteración de este cambio a lo largo de generaciones acaba dando como resultado los colmillos inyectores de veneno.

«Me encanta ver cómo las modernas técnicas de imagen y las bellas microtomografías se aplican para la resolución de una pregunta clásica», afirma Kate Jackson, herpetóloga del Colegio Whitman, en el estado de Washington, sin relación con el nuevo estudio. Matiza que las serpientes también podrían haber adquirido los colmillos a través de otras vías. Por ejemplo, numerosas especies piscívoras poseen dientes acanalados que ayudan a sujetar las presas escurridizas y esos surcos podrían haberse convertido con el tiempo en conductos del veneno. No obstante, esta especialista cree que el estudio revela una nueva característica común de las serpientes y puede brindar pistas a los herpetólogos sobre la evolución de los colmillos en distintos momentos y de forma independiente.

—Riley Black

RECURSOS NATURALES

Minería sostenible

Un nuevo método promete aumentar la eficiencia de las técnicas de extracción de minerales

Obtener minerales del suelo es un trabajo muy desagradecido, ya que la mayor parte de lo que extraen los mineros suelen ser sedimentos inservibles. En algunas minas de cobre chilenas, por ejemplo, se procesan cientos de miles de toneladas de material cada día, «pero el 95 por ciento son desechos», señala D. R. Nagaraj, experto en la industria minera de la Universidad de Columbia. Para separar los preciados minerales, los ingenieros suelen enviar burbujas de aire a través del material. Ahora, un nuevo método podría aumentar la eficiencia de este costoso proceso.

Con la técnica actual, conocida como «lecho fluidizado burbujeante», las burbujas de aire empujan los sedimentos hacia arriba a través de una cámara. Eso separa las partículas de distintos tamaños y permite retirar los residuos en la parte superior. Pero este procedimiento consume mucha agua y energía, en parte porque el movimiento caótico de las burbujas reduce su eficiencia, según explica Chris Boyce, ingeniero químico de la Universidad de Columbia. Las burbujas «se unen y se dividen y no conservan un tamaño uniforme», añade, y eso hace que el proceso de separación sea irregular.

En *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Boyce y sus colaboradores han descrito una forma de mantener las burbujas alineadas, lo que reduce la energía requerida para separar los minerales de los desechos. Para ello, montaron la cámara en una plataforma que vibraba a un ritmo constante y hallaron que las burbujas de aire ya no eran caóticas, sino que se organizaban en filas ascendentes. Las vibraciones hacen que las partículas alternen entre un estado más sólido y otro más fluido, comportándose unas veces como la arena de un castillo construido en la playa y otras como los granos de un reloj de arena, explica Boyce. Los autores documentaron cómo este rápido cambio ordenaba las burbujas, un fenómeno que los modelos previos de las interacciones sólido-gas no lograban predecir.

Esos resultados experimentales se observaron con aparatos y partículas de distintos tamaños, algo que Boyce considera prometedor debido al gran cambio que conlleva pasar del laboratorio a la industria. Kristian Waters, ingeniero de materiales de la Universidad McGill que no participó en el estudio, opina que esa es la pregunta clave: «¿Cómo podemos aumentar la escala del proceso? Algunas minas extraen cientos de miles de toneladas de mineral al día».

Boyce colabora con expertos como Nagaraj para poner en práctica sus hallazgos y reducir la huella ambiental de la minería. Todas las tecnologías incipientes, como los coches eléctricos, siguen precisando minerales, concluye Nagaraj, así que «si la minería no es sostenible, nada lo será».

—Tess Joosse

JOE MCDONALD GETTY IMAGES (*cráneo*); DE «PLICIDENTINE AND THE REPEATED ORIGINS OF SNAKE VENOM FANGS», POR ALESSANDRO PALCI, EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 288, 11 DE AGOSTO DE 2021 (*tomografías de colmillos*)



ECOLOGÍA

Punto de encuentro de las aves marinas

Millones de ellas convergen en una gran zona del Atlántico Norte

Cada año millones de aves marinas procedentes de latitudes remotas se congregan en una vasta región del océano, situada a medio camino entre Escocia y las Bermudas. En un nuevo estudio publicado en *Conservation Letters* en el que se han analizado décadas de datos de seguimiento, se afirma que al menos cinco millones de aves migratorias, representantes de unas dos docenas de especies de ambos hemisferios, buscan alimento en una región del Atlántico Norte de casi 600.000 kilómetros cuadrados.

Hace tiempo que los ecólogos sospechaban que el norte del Atlántico era una zona esencial de alimentación para las aves marinas en migración, pero carecían de datos sobre los desplazamientos que justificasen la protección de esas aguas internacionales. Las aves marinas migratorias son «uno de los taxones más amenazados en este momento», explica Tammy Davies, especialista en conservación de BirdLife International y autora principal del estudio. Las poblaciones de 17 de las 21 especies estudiadas, como los frailecillos, los charranes árticos o los petreles cahow, están en regresión. Sufren la presión de la contaminación, la sobrepesca y las grandes redes industriales, donde quedan atrapadas junto con sus presas. Si bien las colonias de cría en tierra firme suelen estar protegidas, los lugares de alimentación quedan fuera de cualquier jurisdicción nacional por su emplazamiento en alta mar.

El análisis vía satélite de los movimientos migratorios a escala individual ha sorprendido a los investigadores por su enorme número y diversidad, así como por la continuidad del tránsito por esa parte del océano a lo largo de todo el año. «Lo que resulta sorprendente es la cantidad de especies que se congregan en esta área y las distancias que algunas recorren para llegar a ella. Hay ejemplares del remoto Atlántico Sur que viajan 13.000 kilómetros para alimentarse aquí. Sin duda ha de haber algo fabuloso para que emprendan semejante periplo», opina Davies.

Ese «algo fabuloso» probablemente sea un festín brindado por la convergencia de las corrientes marinas, apunta un estudio complementario publicado en *Progress in Oceanography*. En él se aúnan los datos satelitales y los modelos informáticos con la clásica obser-

MEDIOAMBIENTE

Ríos de mercurio

Grandes cantidades de este metal tóxico acaban en los caladeros costeros a través de los cursos fluviales



Los meandros de un río serpentean a través de una isla de Guinea-Bissau, en África Occidental.

Los ríos podrían estar vertiendo cada año hasta un millar de toneladas de mercurio en las costas del planeta, advierte un equipo científico en un artículo de *Nature Geoscience*. Esto los convertiría en la principal vía por la que esta potente neurotoxina alcanza las costas marinas, donde entraña una grave amenaza para la salud pública.

La exposición humana al mercurio está vinculada en gran medida a las pesquerías costeras, donde este metal pesado se acumula en los organismos marinos que acaban en nuestra mesa. Pero una parte relativamente pequeña de toda esa contaminación se origina a lo largo del litoral; el grueso procede de fuentes situadas tierra adentro, como incendios forestales, minas y centrales eléctricas de carbón. Desde hacía tiempo se creía que este metal tóxico viajaba básicamente a través de la atmósfera en forma de vapor o unido a partículas pequeñas en suspensión, pero los nuevos hallazgos indican que los ríos serían el principal canal del mercurio costero.

Los biogeoquímicos de la Universidad Yale Maodian Liu y Peter Raymond han trabajado con otros colegas aunando mediciones de mercurio de ríos de todo el planeta con datos y simulaciones que describen el modo en que los sedimentos y las formas biológicas de carbono se desplazan por las vías acuáticas. «Estos dos elementos [mercurio y carbono] van ligados porque el mercurio suele quedar unido al carbono orgánico en los suelos y los ríos», aclara Raymond. El nuevo modelo de los investigadores indica que los ríos podrían estar transportando una cantidad de mercurio alrededor de tres veces mayor que la atmósfera, y que la mitad de ese total la aportarían los diez ríos más caudalosos del planeta.

Antes ya se había intentado calcular la cantidad de mercurio transportada por los cursos fluviales, pero la mayoría de tales estudios «eran rudimentarios», asegura Lars-Eric Heimbürger-Boavida, investigador del Instituto Mediterráneo de Oceanografía que no ha participado en el nuevo estudio. En la mayoría de los trabajos precedentes se tomaban concentraciones promedio extrapoladas de mediciones hechas en determinados ríos, destaca, «con la premisa de que en otros ríos serían similares». Heimbürger-Boavida alaba el uso de un gran conjunto de datos mundiales, pero advierte de que otras investigaciones podrían definir «costero» de modo distinto, cosa que conduciría a otro cálculo final del

THOMAS FUCHS (*aves*); SI IMAGING SERVICES, IMAZINS Y GETTY IMAGES

vación ornitológica desde un buque que atravesó el Atlántico Norte en 2017. «Creo que aún queda mucho que aprender de la observación directa», afirma el ecólogo de la Universidad de Glasgow Ewan Wakefield, autor principal de este segundo estudio.

En el punto de encuentro, las aves permanecen en esas ricas corrientes cargadas de alimento, explica. Los investigadores observaron incluso que diferentes especies prefieren corrientes distintas, seguramente impulsadas por sus preferencias alimentarias y variaciones en sus hábitos de pesca, como el buceo.

«Resulta increíble haber descubierto un lugar que tiene esa importancia tan singular para las aves marinas, desde las más chicas hasta las pelágicas, de mayor envergadura», afirma la ecóloga Autumn-Lynn Harrison, ajena al estudio. «Es un lugar que satisface a todas.»

Esperan que esos nuevos datos impulsen a la Convención Internacional para la Protección del Entorno Marino del Noreste Atlántico a designar área protegida la región y que esto sirva como precedente para otras similares situadas en alta mar.

—Rebecca Dzombak

impacto de los ríos en comparación con el de la atmósfera.

Según Susan Egan Keane, especialista en salud pública en el Consejo de Defensa de Recursos Naturales, los modelos del ciclo del mercurio, donde se refleja la entrada, la salida y la migración de esta sustancia a través del ambiente, son «el pan de cada día» en la evaluación del riesgo que entraña este contaminante. «Así se predice el modo en que las variaciones en las emisiones [...] se traducen en los cambios previstos de la concentración en el pescado, que a su vez se traducen en cambios en la exposición del ser humano», explica.

Los investigadores subrayan que el aporte de agua y sedimentos de numerosos ríos caudalosos aumentará con el calentamiento planetario, un proceso que podría aumentar el mercurio acarreado. La fusión del permafrost y la variación de las temperaturas marinas también podrían influir en el ciclo de mercurio, explica Keane.

Conocer el papel de los ríos supone un paso adelante hacia una visión más completa del ciclo. Esta información ayudará a los expertos a prever y responder a los peligros del mercurio en un futuro incierto y a predecir mejor cómo reaccionará nuestro planeta a los esfuerzos mundiales por reducir las emisiones de mercurio.

—Elise Cutts



JACK ANDERSEN, GETTY IMAGES

QUÍMICA

La sorprendente complejidad de la cerveza

Un nuevo análisis revela los miles de compuestos presentes en esta bebida

Teniendo en cuenta sus 13.000 años de historia, podríamos pensar que ya lo sabemos todo sobre la cerveza. Sin embargo, un estudio reciente ha examinado con un detalle sin precedentes la composición de esta burbujeante bebida y ha identificado una nueva medida para controlar su calidad.

La cerveza contiene tres ingredientes orgánicos complejos: el cereal, el lúpulo y la levadura. Durante el proceso de elaboración, todos ellos interactúan con los subproductos de los demás, lo que genera cientos de sustancias derivadas que pueden influir en el sabor. Algunos químicos expertos en alimentación consideran abrumadora la complejidad de la cerveza. Pero Stefan Pieczonka, investigador de la Universidad Técnica de Múnich que realiza lo que él llama un «doctorado en cerveza», vio en ella un gran potencial sin explotar.

En colaboración con el químico Philippe Schmitt-Kopplin, de su misma universidad, Pieczonka analizó 400 muestras de cervezas comerciales con un espectrómetro de masas de alta potencia. Su dispositivo separaba las sustancias de una mezcla y luego las identificaba, dividiendo sus moléculas en iones y clasificando estos mediante campos magnéticos. Los investigadores también examinaron un subconjunto de cervezas con un segundo tipo de espectrómetro de masas y, al combinar ambos métodos, lograron identificar más de 7000 iones que nunca antes se habían encontrado en la bebida, explica Schmitt-Kopplin. Luego trabajaron en sentido inverso para deducir las decenas de miles de moléculas que habían producido esos iones, y rastrearon cada molécula hasta vincularla con uno de los ingredientes originales de la cerveza (los investigadores añaden que las muestras sobrantes se aprovecharon para celebrar vibrantes veladas en el laboratorio).

Una de las moléculas descubiertas se originó a partir de una reacción entre los componentes de la levadura, el lúpulo y el arroz. Este último a veces contamina los utensilios o los lotes de cereal con los que se elabora la cerveza. Dado que actualmente no existe ningún control de calidad para detectar la presencia de arroz en la cerveza como contaminante o alérgeno, los autores proponen realizar pruebas en busca de esa nueva molécula. Su trabajo se ha publicado en *Frontiers in Chemistry*.

Gwen Conley, experta en cerveza y directora de calidad e innovación en la destilería Cutwater Spirits que no tomó parte en el estudio, afirma que una prueba de ese tipo podría aumentar la garantía de calidad tanto de la cerveza como de los destilados. «En el caso de la cerveza», comenta, «se podría llevar a cabo en cada etapa».

Saber más sobre los ingredientes de una cerveza también puede resultar útil para la investigación histórica. Pieczonka y Schmitt-Kopplin están realizando el mismo análisis en una cerveza alemana de 1885 para conocer mejor los métodos de elaboración del siglo XIX, un conocimiento que planean emplear para recrear su sabor.

—Maddie Bender

MATERIALES

Imanes bidimensionales

Los imanes de espesor atómico auguran mejoras en el almacenamiento de datos

Desde los ordenadores hasta las tarjetas de crédito y los servidores en la nube, la tecnología actual depende de los imanes para conservar datos codificados en los dispositivos de almacenamiento. Pero la capacidad de estos sistemas se ve limitada por el tamaño de los imanes: por fino que sea el imán, ocupa un espacio que podría servir para guardar información.

Ahora, los autores de un trabajo publicado en *Nature Communications* han diseñado uno de los imanes más finos del mundo: una lámina flexible de cobalto y óxido de zinc de tan solo un átomo de espesor. «Eso significa que podemos almacenar más datos con la misma cantidad de materiales», destaca Jie Yao, ingeniero de la Universidad de California en Berkeley y autor principal del estudio.

Además de reducir el tamaño de los dispositivos tradicionales de almacenamiento de datos, los imanes de menos de un nanómetro de grosor son indispensables para desarrollar la electrónica del espín, o espintrónica. Esta técnica emplea la dirección del espín de los electrones, en lugar de su carga, para codificar los datos. Tales imanes incluso podrían ayudar a llevar los electrones a una superposición cuántica, una situación donde las partículas quedan descritas por varios estados distintos al mismo tiempo. De este modo, los datos podrían almacenarse empleando tres estados (con el espín apuntando «hacia arriba», «hacia abajo», o en una superposición de ambas orientaciones) en vez de los dos habituales.

Por lo general, los imanes nanoscópicos deben enfriarse a temperaturas de hasta −200 grados Celsius para preservar los campos magnéticos. Este requisito supone un gran obstáculo para crear dispositivos espintrónicos comerciales o para reducir el tamaño de los sistemas actuales de almacenamiento de datos. «Uno no quiere llevar encima un refrigerador criogénico», razona David Awschalom, experto en espintrónica de la Universidad de Chicago ajeno al estudio. «Así que es bastante importante disponer de un material que sea compacto y flexible a temperatura ambiente.»

La red bidimensional del nuevo imán funciona sin problemas a temperatura ambiente, e incluso se mantiene magnetizada en condiciones tan calientes como para que hierva el agua. La decisión de combinar esos elementos concretos fue crucial: el zinc y el oxígeno por sí mismos no son magnéticos, pero interactúan con metales magnéticos como el cobalto. El equipo moduló la intensidad magnética de los materiales ajustando la proporción

SISTEMA SOLAR

Charcos en Marte

El lugar de aterrizaje del vehículo explorador Curiosity podría no ser lo que parece


El vehículo explorador Curiosity en Marte.

De todos los descubrimientos que ha realizado en Marte el vehículo explorador Curiosity, de la NASA, el más trascendental es que su lugar de aterrizaje, el cráter de Gale, albergó en su día un enorme y longevo lago. Ahora, sin embargo, un nuevo estudio sugiere que ese «lago» podría haber consistido tan solo en una serie de charcas temporales más pequeñas.

Curiosity comenzó a explorar el cráter de Gale en 2012. Apenas unos meses más tarde, encontró capas de rocas arcillosas (que podrían ser producto del depósito de sedimentos en aguas estancadas), así como guijarros modelados por el flujo de un antiguo río. Esos hallazgos tuvieron lugar en la base del monte Sharp, que se eleva 5,5 kilómetros sobre el centro del cráter. Al ascender por la base de esa montaña, Curiosity también detectó minerales alterados por el agua esparcidos por el terreno. La conclusión parecía casi ineludible: hace unos 3700 millones de años, el cráter de Gale albergó una gran masa de agua que podría haber persistido durante millones de años y sustentado microorganismos. Y los sedimentos arrastrados al lago fueron dando forma al monte Sharp bajo la superficie.

Sin embargo, los planetólogos de la Universidad de Hong Kong Jiacheng Liu, Joe Michalski y Mei-Fu Zhou han publicado una nueva interpretación en *Science Advances*. Los expertos sugieren que el monte Sharp surgió al aire libre a partir de los sedimentos transportados por el viento y más tarde sufrió la erosión del agua: las precipitaciones crearon estanques efímeros donde el líquido se filtró a través de los sedimentos. Los microbios también podrían haber prosperado en esas exiguas aguas superficiales, pero solo durante un tiempo relativamente breve; en unas pocas decenas de miles de años, los estanques habrían desaparecido del monte Sharp y de su base. Estas conclusiones se basan en las propiedades químicas de un grupo de rocas sedimentarias (la llamada formación Murray) que examinó Curiosity mientras subía por el monte Sharp.

«Jiacheng estudió con gran detalle los minerales y las abundancias de los elementos que detectó el vehículo explorador al ascender desde la base del cráter, a lo largo de los más de 400 metros [de desnivel] que recorrió en los primeros ocho años de la misión», apunta Michalski. El análisis reveló un cambio gradual a medida que Curiosity ganaba altura: los elementos más susceptibles de ser arrastrados por el agua, como el

THOMAS FUCHS (*imanes*); NASA/JPL-CALTECH/MSSS (*Curiosity*)

entre los átomos de cobalto y las moléculas de óxido de zinc. El valor óptimo se situó en torno al 12 por ciento de cobalto: por debajo del 6 por ciento, el imán era demasiado débil para resultar eficaz, y por encima del 15 por ciento se tornaba inestable.

Yao cree que los electrones móviles del óxido de zinc ayudan a estabilizar los átomos de cobalto, manteniendo intacto el campo magnético. «La hipótesis actual», explica, «es que los electrones actúan como mensajeros que permiten que los átomos de cobalto "hablen" entre ellos».

Stefano Sanvito, físico computacional del Trinity College de Irlanda que tampoco participó en el estudio, afirma que la utilidad del imán dependerá de cómo interactúe con otros materiales bidimensionales. Apilando diversas capas de un solo átomo «como en una baraja de cartas», añade, los ingenieros podrán diseñar dispositivos espintrónicos para multitud de aplicaciones, desde la encriptación segura de datos hasta la computación cuántica. «Va a ser muy divertido», concluye el investigador.

—*Joanna Thompson*

---

hierro, se iban volviendo más escasos y daban paso a elementos menos solubles como el aluminio. Ese patrón recuerda a la meteorización «de arriba abajo» causada por la lluvia que muestran muchas formaciones rocosas de la Tierra.

«De confirmarse, el resultado pondría en tela de juicio nuestras ideas sobre el origen de las montañas de rocas sedimentarias de Marte», admite Edwin Kite, planetólogo de la Universidad de Chicago ajeno al estudio. Sin embargo, añade, para verificarlo sobre el terreno en el cráter de Gale harían falta herramientas de las que carece Curiosity, como un espectrómetro de rayos X de muy alta resolución para medir mejor las abundancias de los elementos. El sucesor de Curiosity, Perseverance, posee justo ese instrumento, pero se halla a miles de kilómetros, en el cráter Jezero.

Por ahora, a falta de datos más concluyentes, el equipo de Curiosity mantiene su interpretación original, señala Kirsten Siebach, planetóloga de la Universidad Rice e integrante de los equipos científicos de Curiosity y Perseverance. «No estoy convencida de que sea el momento de cambiar nuestro relato sobre el cráter de Gale», afirma, «pero, según vamos obteniendo nuevas pruebas, debemos estar dispuestos a refinar nuestras conclusiones previas».

—*Lee Billings*

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Las abejas, unas arquitectas dotadas

Se demuestra su habilidad para adaptar los métodos de construcción de los panales

Charles Darwin describió la habilidad de las abejas melíferas para construir panales perfectos como «el más asombroso de todos los instintos conocidos». Cada celdilla hexagonal está construida con tal precisión y tanto esmero que contemplarlos es una delicia para la vista. Ahora, una nueva investigación pone de manifiesto la notable adaptabilidad de estos insectos a la hora de incorporar distintos tamaños de celda en una malla de apariencia impecable, y la unión perfecta de los panales construidos simultáneamente desde múltiples direcciones.

Las celdillas adyacentes que albergan la miel suelen tener un tamaño uniforme, pero las obreras han de construir algunas más grandes para criar a los zánganos y otras más pequeñas destinadas a sus iguales. También han de alinear y unir las partes de cada panal, que construyen desde distintos puntos de partida. Averiguar cómo consiguen hacer todo eso con semejante pericia «es una antigua incógnita», afirma Michael Smith, ecólogo especializado en etología de la Universidad Auburn.

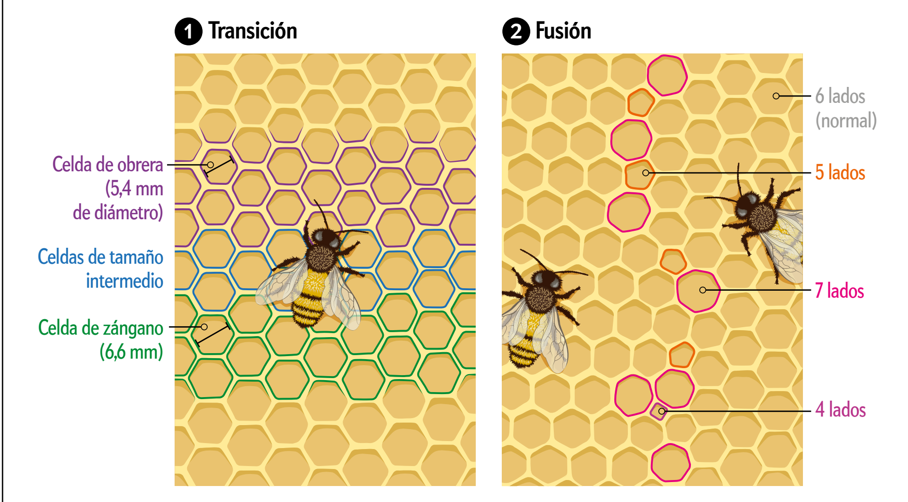
En un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Smith y sus colaboradores describen la medición de 19.000 celdillas en 12 colmenas de abejas melíferas italianas (*Apis mellifera ligustica*). Mediante el análisis automático de imágenes, examinaron el centro y los vértices de las celdillas para descubrir variaciones en las formas y dimensiones. «De no ser por el nuevo método, habría sido inviable medir con precisión miles de celdillas», confiesa Smith.

Así han descubierto que las abejas modifican con destreza las dimensiones para fusionar los panales tan limpiamente como sea posible. Recurren a formas irregulares, sobre todo parejas de heptágonos y pentágonos, y modifican las dimensiones y la orientación de las celdas del panal con tanta maestría que se las puede considerar dotadas de «un verdadero talento arquitectónico», escriben los investigadores.

«La malla hexagonal del panal, construida gracias al esfuerzo colectivo de cientos de obreras sin supervisión, conduce a la especulación de que debe intervenir un comportamiento innato, robótico», opina Lars Chittka, entomólogo de la Universidad Queen Mary, ajeno al estudio. «Pero un robot sencillo no posee ese grado de adaptabilidad ni esa capacidad de rectificación.»

Raghavendra Gadagkar, etólogo especializado en insectos del Instituto Indio de Ciencias en Bangalore, que tampoco ha formado parte del estudio, sugiere que examinar la coordinación de las abejas en la construcción de los panales ayudaría a avanzar en el campo de la robótica. «Imagínese si se pudieran programar robots con ese ingenio abejil», apunta.

—*Saugat Bolakhe*



Conocidas por su destreza en la construcción de panales de hexágonos perfectos, las abejas son capaces de alterar esas formas regulares si es preciso. Por ejemplo, cuando dejan de fabricar las celdillas pequeñas donde crían a las obreras para pasar a las de los zánganos reproductores, de mayor tamaño, construyen una o dos filas de celdas de dimensiones intermedias (1). Y como inician la construcción desde puntos distintos, han de encontrar el modo de combinar distintas secciones para dar forma a un único panal, una operación que suele exigir la combinación de celdillas de cuatro, cinco y siete lados (2).

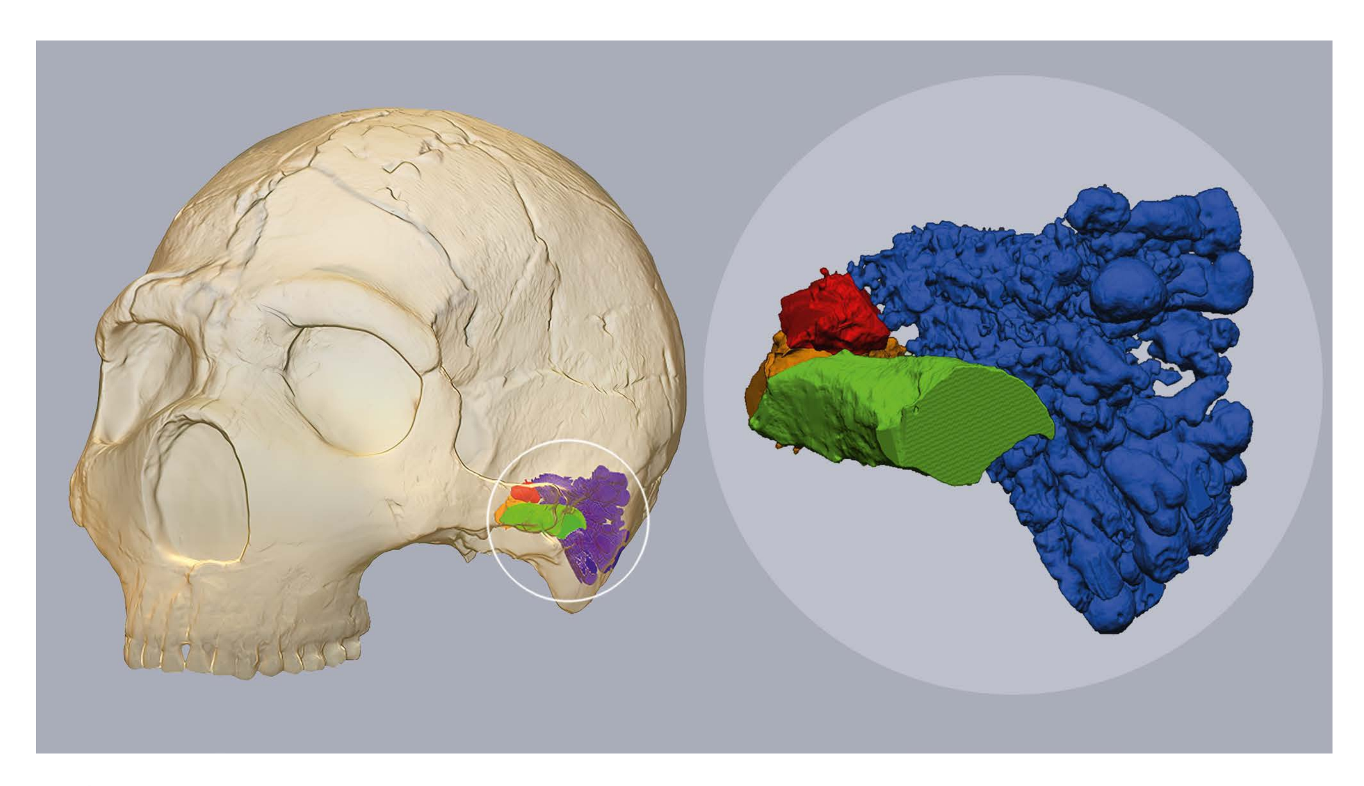
FUENTE: «IMPERFECT COMB CONSTRUCTION REVEALS THE ARCHITECTURAL ABILITIES OF HONEYBEES», POR MICHAEL L. SMITH, NILS NAPP Y KIRSTIN H. PETERSON EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 118, 3 DE AGOSTO DE 2021. BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*)

EVOLUCIÓN HUMANA

La voz del neandertal

La reconstrucción de las capacidades auditivas de los neandertales apoya la idea de que estos pudieron hablar

MERCEDES CONDE VALVERDE



CRÁNEO DE NEANDERTAL procedente del yacimiento Amud, en Israel. La buena conservación de este fósil ha permitido la reconstrucción tridimensional de las cavidades de su oído izquierdo (*ampliadas a la derecha*): el conducto auditivo externo (*verde*), la cavidad timpánica (naranja), el antro mastoideo (*rojo*) y las celdillas mastoideas (*azul*). El análisis de estos datos ha revelado que los neandertales podían hablar.

MERCEDES CONDE Y ELENA SANTOS

Una de las cuestiones más debatidas en el campo de la paleoantropología es si los neandertales pudieron comunicarse mediante un lenguaje oral similar, en eficiencia y complejidad, al habla humana. En un trabajo reciente publicado en la revista *Nature Ecology & Evolution* hemos ofrecido una prueba sólida de que así fue. Gracias a la reconstrucción de las capacidades auditivas de cinco ejemplares fósiles de neandertales, hemos demostrado que disponían de un lenguaje oral equivalente al nuestro.

Si hay un tema de estudio especialmente difícil en el ámbito de la evolución humana, este es el de establecer las capacidades comunicativas de las especies extintas, puesto que las palabras no fosilizan. Una primera línea de investigación para abordar este problema, desde la perspectiva de la paleontología, consiste en intentar establecer las capacidades fonadoras de los homininos del pasado a partir de la reconstrucción de la anatomía y la fisiología de sus vías aéreas superiores.

Los primeros estudios sobre esta cuestión, basados en la anatomía ósea de la base del cráneo, indicaban que las vías aéreas de los homininos, desde los más primitivos hasta los neandertales, se asemejaron más a las de los chimpancés que a las de los humanos actuales. Es decir, ninguna de esas especies pudo producir con fluidez los sonidos del habla humana. Sin embargo, los trabajos publicados desde finales de la década de los noventa pusieron en duda estos resultados y apuntaron que, en realidad, las vías aéreas de los neandertales fueron en esencia parecidas a las nuestras. Lo cierto es que las vías aéreas superiores están formadas por tejidos blandos (ligamentos, músculos y cartílagos) que no fosilizan, por lo que no es posible establecer con la suficiente fiabilidad cómo habrían sido en las especies extintas.

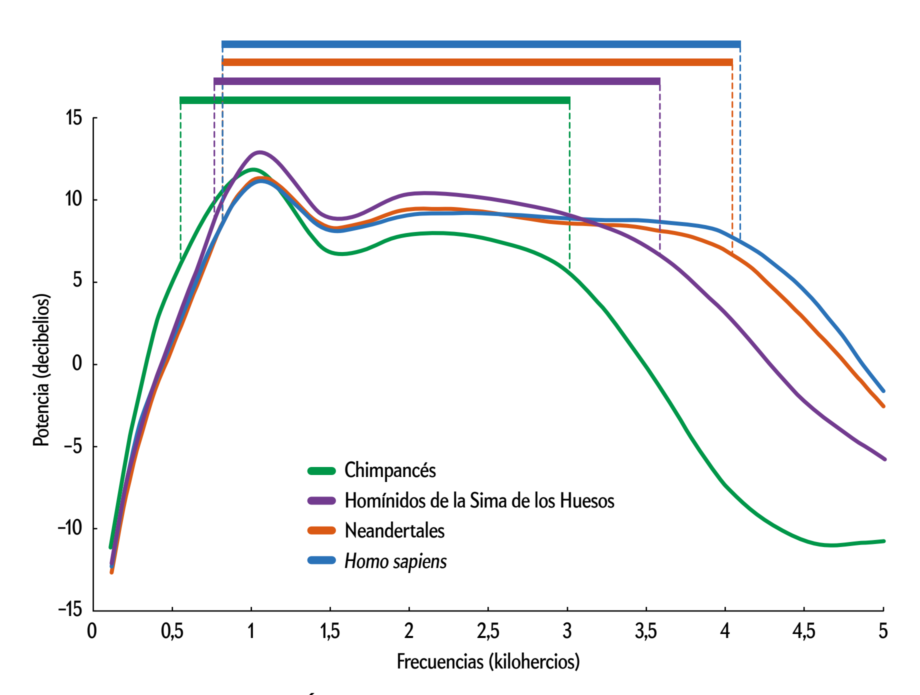
Otra línea de investigación sobre el tema es el estudio del ADN fósil, que ha permitido establecer la presencia en los neandertales de la denominada variante humana del gen *FOXP2*. En nuestra especie, esta variante guarda una estrecha relación con los procesos mentales involucrados en la producción del lenguaje, lo que ha llevado a algunos autores a considerar que los neandertales fueron capaces de hablar como nosotros. Aunque se trata de un dato muy sugerente, hay otros autores que prefieren ser más

cautos a la hora de aceptarlo como una prueba directa de presencia del habla en los neandertales, pues aún no se conoce lo suficiente sobre la relación de este gen con el lenguaje oral en nuestra especie.

Los huesos del oído y el habla

En este contexto, hace dos décadas nuestro equipo se propuso abordar el problema desde una perspectiva diferente. Dado que una parte muy importante del oído está formada por estructuras óseas, que sí fosilizan, nos propusimos reconstruir aspectos fundamentales de la audición de los ejemplares fósiles. En concreto, nos centramos en las estructuras del oído externo y medio, que son las responsables de la transmisión de la energía sonora desde el exterior hasta el oído interno. Durante dicha transmisión, las estructuras del oído externo y medio realizan un filtrado acústico que hace que algunas frecuencias lleguen con mayor energía que otras hasta la cóclea. El filtrado depende de las propiedades físicas (longitudes, secciones, volúmenes y masas) de dichas estructuras y es el responsable de que cada especie oiga mejor en un determinado intervalo de frecuencias. En la mayoría de los mamíferos ese intervalo es el que se emplea en la comunicación intraespecífica, esto es, entre los individuos de una misma especie. Dicho de otro modo, para comunicarse, los animales emiten en las frecuencias que mejor oyen.

Para reconstruir el filtrado acústico de una especie fósil es preciso medir las dimensiones de las estructuras de su oído externo y medio. Para ello, es necesario realizar cientos de tomografías de gran precisión de dicha región anatómica y procesarlas informáticamente para obtener modelos anatómicos virtuales tridimensionales que pueden ser medidos con precisión. Con esos datos, se calcula el filtrado acústico en cada una de las frecuencias mediante el empleo de un modelo biofísico diseñado en el campo de la ingeniería de las telecomunicaciones. A partir de dicho filtrado es posible establecer la amplitud del intervalo de frecuencias de mayor sensibilidad acústica. Lo interesante de todo esto es que existe una relación directa entre esa amplitud y la eficiencia (mayor velocidad de transmisión y menor tasa de error) de la comunicación: cuanto mayor sea la amplitud del intervalo, más eficiente será el sistema de comunicación. Así, por ejemplo, en los chimpancés el intervalo abarca en promedio unos 2,5 kilohercios, mientras que en los humanos se extiende unos 3,5 kilohercios.



LAS CURVAS DE TRANSMISIÓN de los sonidos, desde el oído externo y medio hasta el oído interno, revelan las diferencias en la capacidad auditiva, y por tanto del habla, entre los chimpancés, los homínidos de la Sima de los Huesos, los neandertales y los humanos modernos. Las curvas indican qué sonidos (*frecuencias*) se perciben con mayor o menor intensidad (*potencia*). El intervalo de frecuencias de mayor sensibilidad acústica (*barras horizontales superiores*) de los chimpancés es claramente más corto que el resto, mientras que los neandertales y los humanos presentan un intervalo y una potencia similares. (Los datos corresponden a valores medios.)

En un trabajo publicado en 2015, aplicamos esta nueva metodología a los fósiles de australopitecinos de entre 2 y 2,5 millones de años de antigüedad. Demostramos que la amplitud de su intervalo de frecuencias de máxima sensibilidad acústica era indistinguible del de los chimpancés, lo que indica que la eficiencia de su comunicación oral tampoco sería diferente. También reconstruimos el filtrado acústico de ejemplares fósiles del yacimiento de la Sima de los Huesos, enclavado en la sierra de Atapuerca, de unos 450.000 años de antigüedad. Calculamos que los homininos que habitaron la cueva presentaron una amplitud del intervalo de 2,9 kilohercios en promedio. Ese resultado permite deducir que dispusieron de un sistema de comunicación oral más eficiente que el de los chimpancés, pero menos que el de nuestra especie.

Comunicación entre neandertales

En nuestro último trabajo hemos abordado la cuestión de las capacidades comunicativas de los neandertales mediante el estudio de cinco ejemplares cuyos oídos se hallan especialmente bien conservados. Corresponden a especímenes de distintos yacimientos situados en Francia, Israel y Croacia. Los más antiguos están datados en cerca de 120.000 años de antigüedad, y los más modernos, en unos 45.000 años. Puesto que abarcan la mayor parte del período de tiempo en que vivió la especie, pensamos que constituyen una buena representación de la variación de los neandertales. Hemos demostrado que la amplitud del intervalo de frecuencias de mayor sensibilidad acústica de estos homininos es casi indistinguible del de nuestra especie, siendo su promedio de alrededor de 3,3 kilohercios. Ello indica que los neandertales presentaban la base anatómica necesaria para disponer de un sistema de comunicación oral tan eficiente como el nuestro.

Nuestros resultados son plenamente congruentes con los espectaculares descubrimientos realizados en las dos últimas décadas en el campo de la arqueología, que demuestran el gran desarrollo cognitivo de los neandertales. En ese tiempo

se han hallado pruebas indiscutibles de que utilizaban objetos de adorno personal, como conchas perforadas, garras de águila manipuladas para configurar colgantes y pigmentos artificiales. A ello se suma el reciente descubrimiento, en el interior profundo de la cueva Bruniquel, en Francia, de unos círculos de piedra enigmáticos construidos por los neandertales con restos de estalactitas y estalagmitas. Finalmente, se han publicado dataciones radiométricas de algunas pinturas rupestres de la península ibérica cuya antigüedad (cercana a los 60.000 años) señala a estos homininos como los únicos autores posibles.

Gracias a todas esas pruebas, nuestra imagen sobre los neandertales ha cambiado radicalmente. De la visión que teníamos de ellos a finales del siglo xx como seres cuasisimiescos, hemos pasado a contemplarles como a seres tan humanos como nosotros. Sin duda, nuestros antepasados también debieron de considerarlos como seres humanos, pues hoy sabemos que hubo frecuentes cruzamientos e hibridaciones con ellos. Y resulta estimulante imaginar que, en esos encuentros, idearan también una lengua común con la que comunicarse.

Mercedes Conde Valverde
es investigadora de la Cátedra de Otoacústica Evolutiva y Paleoantropología, de la Universidad de Alcalá y HM Hospitales, en Madrid.

PARA SABER MÁS

Auditory capacities in middle Pleistocene humans from the Sierra de Atapuerca in Spain. I. Martínez et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, págs. 9976-9981, mayo de 2004.
Early hominin auditory capacities. Rolf Quam et al. en *Science Advances*, vol. 1, e1500355, septiembre de 2015.
Neanderthals and *Homo sapiens* had similar auditory and speech capacities. Mercedes Conde-Valverde et al. en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 5, págs. 609-615, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución del lenguaje. Jan Dönges en *MyC*, n.º 40, 2010.
Hablar a través del tiempo. Christine Kenneally en *IyC*, noviembre de 2018.

TECNOLOGÍA

Cómo convertir el eco en imágenes 3D

Una nueva técnica asistida por inteligencia artificial supera al radar, el sonar y el lídar a la hora de obtener imágenes tridimensionales a partir del mismo principio que usan los murciélagos y otros animales

ALEJANDRO TURPIN Y DANIELE FACCIO

No son pocos los ejemplos de tecnologías que nos rodean y que están inspiradas en el mundo natural: desde la forma de las alas de los aviones hasta nuevos tejidos que imitan la piel de los tiburones, pasando por brazos robóticos que se inspiran en la trompa de los elefantes. Así ocurre también con los sistemas de detección por ecolocalización, el método que emplean los murciélagos y otros animales para orientarse.

El principio básico de la ecolocalización consiste en enviar pulsos de onda (es decir, paquetes de energía, ya sea acústica, de radio o láser) con una duración muy corta en una dirección determinada. Después se mide cuánto tiempo tardan esos pulsos en regresar al emisor. Este dato, conocido como tiempo de retorno, permite estimar, junto con la información relativa a la dirección de la emisión del pulso, la posición tridimensional de un objeto.

Sin embargo, si los pulsos son emitidos en todas direcciones, el tiempo de retorno medido por el detector solo nos permitirá conocer la distancia a la que se encuentra el objeto, pero no su posición en el espacio. Esto podría hacernos pensar que la ecolocalización con ondas multidireccionales y con un solo detector constituye una tarea imposible.

En un trabajo publicado hace poco por nuestro grupo de investigación de la Universidad de Glasgow, hemos presentado un nuevo sistema de imagen en 3D que, gracias a algoritmos de aprendizaje automático, consigue explotar la información registrada en el tiempo de retorno de ondas que se reflejan múltiples veces. Este método, que hemos bautizado como «ecos multicamino», no solo permite localizar la posición de un objeto, sino también conocer su forma e incluso extraer información sobre los signos vitales de un individuo. Además, la técnica respeta en todo momento la privacidad de las personas, ya que no requiere ninguna cámara. Ello promete importantes avances en materia de seguridad y en vigilancia de personas mayores o pacientes en hospitales, entre otras aplicaciones.

De los murciélagos al lídar

En el caso de los murciélagos, su complejo sistema de ecolocalización les permite emitir breves pulsos de onda a distintas frecuencias. A su vez, el tiempo de retorno de esas ondas proporciona información sobre la distancia a la que se encuentra un obstáculo con una resolución espacial inferior a la décima de milímetro. La diferencia en el tiempo de retorno en cada una de las orejas indica al animal si el obstáculo se encuentra a su derecha o a su izquierda con una precisión de hasta 2 grados, mientras que la forma de las orejas le permite obtener información sobre la altitud del objeto.

Además, el sistema auditivo de los murciélagos es tan preciso que les informa de si una presa se acerca o se aleja de ellos, de manera similar a los sistemas de tráfico por radar basados en el efecto Doppler. Este sentido también les permite distinguir entre texturas e incluso formas, lo que los convierte en los grandes depredadores que son durante la noche.

De manera similar, y aunque con menos precisión, los delfines y otros animales son capaces de utilizar la ecolocalización para saber dónde se encuentran los bancos de peces o dónde hay un peligro potencial, aun a grandes distancias. Y tales habilidades no se limitan a los animales no humanos: hace poco se ha demostrado que incluso las personas ciegas debidamente entrenadas pueden utilizar la ecolocalización para obtener información de su entorno mediante la



LOS MURCIÉLAGOS son capaces de generar una «imagen» tridimensional de sus alrededores gracias a un refinado sistema de ecolocalización (*en la fotografía, una imagen estroboscópica infrarroja de murciélagos de la especie* Pipistrellus pygmaeus *cazando insectos por la noche*). Una nueva técnica basada en el mismo principio permite obtener imágenes e incluso información sobre los parámetros vitales de una persona a partir de dispositivos comunes y sin necesidad de cámaras.

GETTY IMAGES/PAUL COLLEY/ISTOCK

emisión de rápidos chasquidos con la lengua.

Hace tiempo que la tecnología viene explotando este mismo principio, por lo que hoy abundan las técnicas basadas en la ecolocalización. Estas incluyen el radar (que opera con ondas de radio), el sonar (con ondas acústicas) o el lídar (con láser). Todas ellas utilizan un emisor de pulsos y un sensor para medir el tiempo de retorno: el emisor envía un pulso en una dirección, y espera a que el receptor mida el tiempo que tarda en regresar tras reflejarse en una superficie. Acto seguido, se emite un pulso en otra dirección y se vuelve a medir el tiempo de retorno. El proceso se repite hasta escanear todo el campo de visión. Gracias a ello, es posible reconstruir una imagen tridimensional de la escena donde la resolución en profundidad viene dada por la duración de los pulsos emitidos.

Estas técnicas han cambiado el mundo al permitir que los barcos puedan detectar peligros a larga distancia, que sea posible localizar aviones enemigos en los conflictos bélicos, o incluso dotando de visión 3D a los vehículos autónomos. Sin embargo, el sistema de escaneo hace que estas tecnologías resulten costosas, lentas, pesadas y voluminosas, lo que restringe muchas de sus aplicaciones.

Por otro lado, suprimir el sistema de escaneo manteniendo un único detector conlleva un problema fundamentalmente irresoluble: en tal caso, el tiempo de retorno solo permite determinar la distancia a la que se halla un objeto, pero no establecer en qué dirección se encuentra. Y si bien es posible usar una red de detectores para conocer el tiempo de retorno en cada región del espacio, estos sistemas no son fáciles de fabricar de manera compacta y económica.

Ecolocalización multicamino

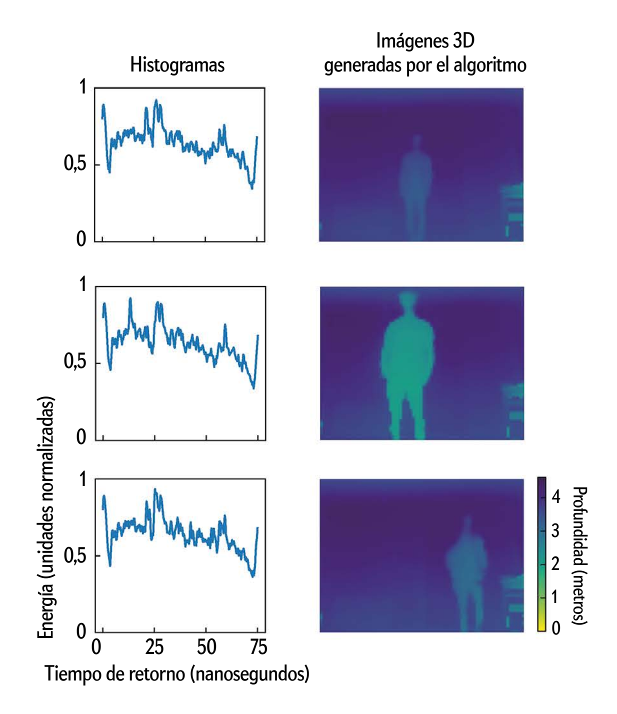
Nuestro grupo lleva años trabajando con técnicas de imagen y detección. Intrigados por el problema de captar imágenes en 3D con un solo detector y sin ningún tipo de sistema de escaneo, nos hicimos la siguiente pregunta: ¿cómo obtener información en 3D de todo lo que hay en una habitación desde una sola perspectiva?

La solución que encontramos a esta pregunta era simple, aunque no muy ortodoxa: si las paredes de una habitación estuvieran cubiertas de espejos, entonces la luz se reflejaría no una, sino múltiples veces en las paredes y en los diferentes objetos de la habitación, lo que permitiría obtener información sobre prácticamente cualquier zona. Esta idea, aunque efectiva, tiene la limitación de que las paredes de una habitación no reflejan la luz (lo cual constituye la razón principal que nos impide ver qué hay detrás de las esquinas).

Sin embargo, esto no ocurre para las ondas de radiofrecuencia o para las acústicas. En tal caso, las paredes de una habitación actúan como espejos parciales, lo que permite que estas ondas puedan rebotar múltiples veces en el entorno, interaccionando a su paso con todos los elementos presentes en la estancia.

Nuestra técnica de imagen 3D mediante ecos multicamino tiene un funcionamiento relativamente sencillo. Un emisor envía pulsos de onda que viajan en todas direcciones, se reflejan en todas las superficies e interaccionan con todos los objetos de la habitación. Después, un detector registra el tiempo de retorno de los ecos en forma de histograma temporal: una cadena unidimensional de datos, donde cada posición indica la energía recibida a cada tiempo de retorno.

Tales datos nunca tendrían sentido para un ser humano y parecerían ser totalmente indescifrables. No obstante, es posible darles sentido gracias a la inteligencia artificial: un algoritmo de aprendizaje automático es capaz de interpretar el histograma temporal y ofrecer una aproximación a la imagen tridimensional de la



ECOS DE ONDA MULTICAMINO: Un nuevo método de ecolocalización permite generar imágenes tridimensionales con un único detector a partir de pulsos de onda que viajan y se reflejan varias veces en los objetos circundantes (*izquierda*). Un receptor registra el tiempo de retorno de las ondas en forma de histograma (*centro*) y un algoritmo de inteligencia artificial previamente entrenado consigue convertir esos datos «unidimensionales» en una imagen 3D (*derecha*). La técnica no requiere cámaras, se basa en dispositivos muy simples y garantiza la privacidad, por lo que podría resultar de gran utilidad en aplicaciones de seguridad en hospitales y otras instalaciones.

escena. Para ello, el algoritmo necesita ser entrenado con ejemplos de imágenes 3D y con sus correspondientes ecos de onda multicamino, gracias a lo cual consigue aprender la correlación existente entre dichos datos.

Tras el entrenamiento, el algoritmo puede trabajar en tiempo real y ofrecer imágenes en 3D del entorno simplemente a partir de los ecos de onda. Esto nos ha permitido, por ejemplo, detectar la presencia de una persona y «ver» cómo camina por una habitación sin ningún tipo de cámara. Todo ello, además, empleando dispositivos muy sencillos, como emisores de radiofrecuencia en el régimen de los 77 gigahercios (muy similares a los empleados en la tecnología wifi o en los sistemas de telefonía 5G) u ondas acústicas generadas con altavoces de ordenador (de 5 kilohercios, perfectamente audibles). Ello abre la puerta a crear sistemas de imagen 3D con prácticamente cualquier dispositivo que emita y reciba ondas, ya se trate de un teléfono móvil, de un enrutador wifi o incluso de sensores de aparcamiento para automóviles.

Garantía de privacidad

Actualmente estamos trabajando en mejorar nuestro diseño y probándolo con diferentes dispositivos de electrónica de consumo. Una de las claves de esta nueva técnica es precisamente su sencillez: gracias a un algoritmo convenientemente entrenado y a una metodología original, somos capaces de transformar cualquier aparato capaz de emitir y detectar ondas en un sistema de imagen 3D.

Es importante señalar que la resolución que puede conseguirse con este método se halla limitada por la tecnología de ondas que utiliza. Pero, contrariamente a lo que pudiera parecer, esto constituye una gran ventaja, ya que el sistema no puede lograr la resolución necesaria para determinar los rasgos de una persona e identificarla. Ello permite respetar la privacidad en todos los contextos, aunque sí podamos especificar a qué velocidad se mueve un individuo o incluso su pose corporal.

Tales características hacen de esta técnica un instrumento ideal en aquellas situaciones donde prima la privacidad, como los hogares de personas que requieren atención especial, hospitales o incluso baños y duchas públicas. De hecho, la tecnología es tan sensible que permite detectar la frecuencia de respiración de un individuo, lo que podría encontrar aplicaciones en telemedicina.

Por lo demás, también estamos trabajando en crear sistemas de imagen portátiles para personas con poca o nula visión, a fin de que puedan proporcionarles información del entorno a partir de, por ejemplo, señales táctiles. Y todo ello sin más que habernos inspirado en la naturaleza para aprovechar la gran cantidad de información contenida en los ecos de onda. Una muestra más de que el avance científico y técnico está muchas veces más impulsado por las buenas ideas que por el uso de tecnologías de frontera.

Alejandro Turpin *investiga en el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de Barcelona.* ***Daniele Faccio*** *investiga en la Escuela de Física y Astronomía de la Universidad de Glasgow.*

PARA SABER MÁS

Non-line-of-sight imaging. Daniele Faccio en *Optics and Photonics News*, vol. 30, págs. 36-43, enero de 2019.

3D imaging from multipath temporal echoes. Alex Turpin et al. en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 174301, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Sistema acústico de orientación. Manfred Kössl y Marianne Vater, en *Mente y Cerebro*, n.º 4, 2003.

La batalla evolutiva acústica. William E. Conner en *IyC*, febrero de 2014.

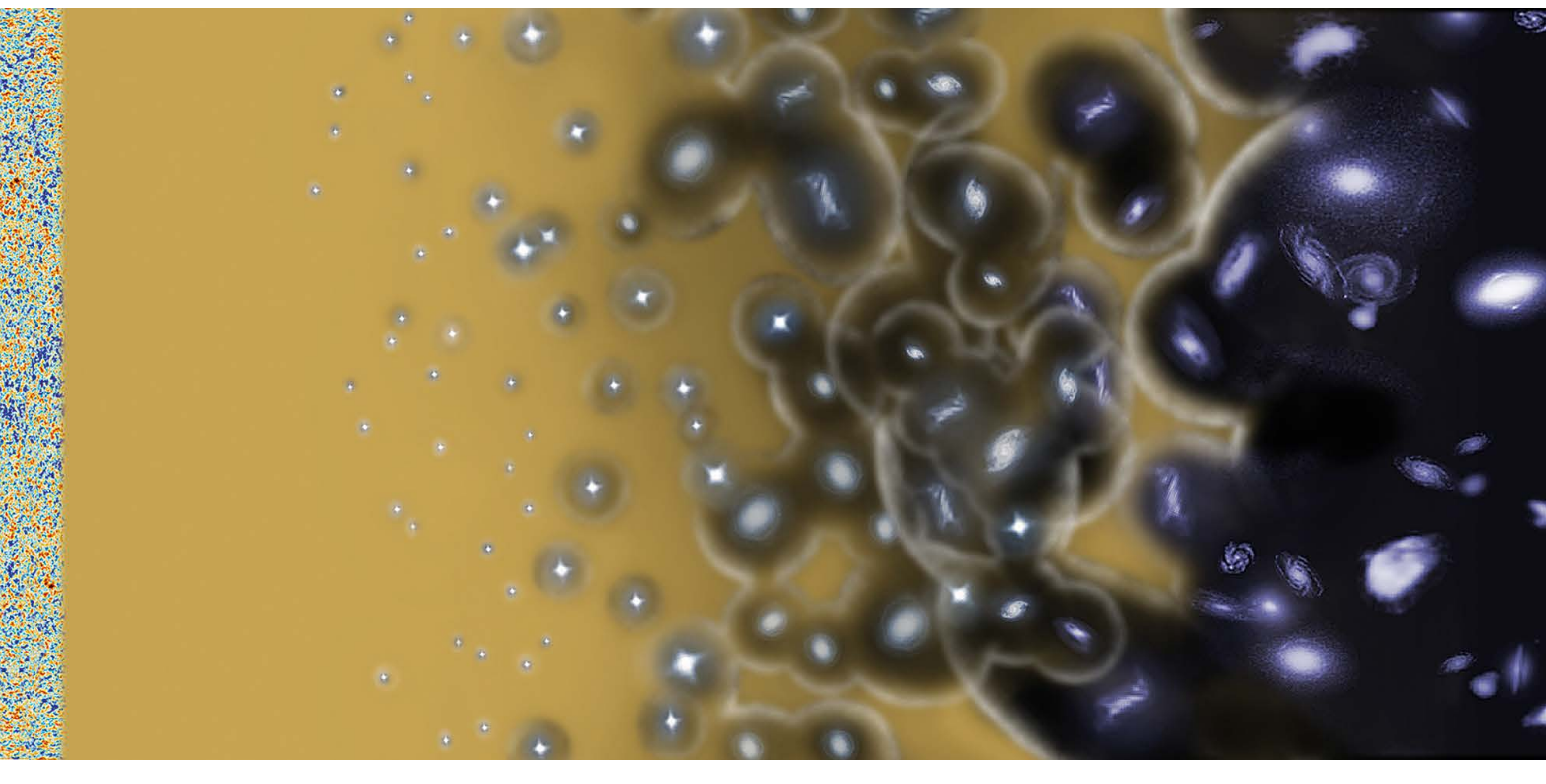
CORTESÍA DE LOS AUTORES

COSMOLOGÍA

Un experimento halla indicios de un nuevo tipo de energía oscura

En caso de confirmarse, el hallazgo podría resolver el misterio relativo a la tasa de expansión del universo actual

DAVIDE CASTELVECCHI



REPRESENTACIÓN ARTÍSTICA de la evolución del universo desde la emisión del fondo cósmico de microondas (*izquierda*) hasta la formación de las primeras estrellas y galaxias (*centro y derecha*).

ESA-C. CARREAU

Dos trabajos han encontrado indicios preliminares de un nuevo tipo de energía oscura (el misterioso agente responsable de la expansión acelerada del universo) que habría existido durante los primeros 300.000 años de vida del cosmos. Ambos estudios, aparecidos hace unos días en el repositorio de prepublicaciones arXiv, afirman haber identificado un posible rastro de esta «energía oscura temprana» en los datos recopilados entre 2013 y 2016 por el Telescopio Cosmológico de Atacama (ACT), en Chile. En caso de confirmarse, el hallazgo podría ayudar a resolver un persistente misterio relativo a las observaciones del cosmos primitivo, las cuales parecen ser incompatibles con la tasa de expansión cósmica que arrojan las mediciones del universo cercano.

Por el momento, los datos son solo preliminares. «Hay varias razones para ser cautos a la hora de interpretar esto como un descubrimiento de nueva física», advierte Silvia Galli, cosmóloga del Instituto de Astrofísica de París que no ha tomado parte en ninguno de los dos estudios. Los autores de ambos trabajos, uno publicado por el equipo del ACT y el otro por un grupo independiente, admiten que los datos todavía no son lo suficientemente sólidos para proclamar con confianza la detección del nuevo fenómeno. Pero sostienen que otras mediciones del ACT, así como las de otro observatorio, el Telescopio del Polo Sur, en la Antártida, podrían proporcionar pronto pruebas más sólidas.

«Si esto es realmente cierto —si en el universo primitivo realmente hubo una energía oscura temprana—, deberíamos ver una señal intensa», apunta Colin Hill, coautor del artículo del equipo del ACT y cosmólogo de la Universidad de Columbia.

Pistas en el fondo de microondas

Tanto el ACT como el Telescopio del Polo Sur han sido diseñados para analizar con detalle el fondo cósmico de microondas, la radiación primordial referida a veces como el «eco» de la gran explosión y uno de los pilares sobre los que se sustenta la comprensión moderna del universo. Al cartografiar las sutiles variaciones que presenta esta luz en las diferentes direcciones del cielo, los físicos han hallado pruebas más que convincentes del modelo cosmológico estándar, la teoría vigente

que describe la composición y evolución del universo desde sus inicios.

Dicho modelo contempla un cosmos compuesto por tres sustancias básicas: la energía oscura (causante de la expansión acelerada del universo actual), la igualmente misteriosa materia oscura (la principal responsable de la formación de las galaxias) y la materia ordinaria, la cual solo daría cuenta del 5% de la masa y la energía total del cosmos.

En los últimos años, el satélite Planck, una misión de la Agencia Espacial Europea que estuvo activa entre 2009 y 2013, ha proporcionado los mapas más completos del fondo cósmico de microondas. Si se asume que el modelo cosmológico estándar es correcto, los datos de Planck permiten predecir con gran exactitud la tasa a la que tendría que estar expandiéndose el cosmos en la actualidad. Sin embargo, a lo largo de los últimos años, la medición directa de esa tasa de expansión mediante supernovas y otras técnicas ha arrojado un resultado entre un 5% y un 10% mayor que el predicho a partir de los datos de Planck.

Los teóricos han sugerido todo tipo de modificaciones del modelo estándar para explicar esa diferencia. Hace dos años, el cosmólogo de la Universidad Johns Hopkins Marc Kamionkowski y sus colaboradores sugirieron añadir un ingrediente más al modelo estándar: la «energía oscura temprana». Su propuesta hacía más precisa una idea en la que ellos y otros grupos habían estado trabajando durante varios años, y postulaba una especie de «fluido» que habría impregnado el universo primigenio antes de desvanecerse unos cientos de miles de años después de la gran explosión. «No es un argumento convincente, pero es el único modelo que conseguimos que funcione», explica Kamionkowski.

Esa energía oscura temprana no habría sido lo suficientemente intensa como para causar una expansión acelerada del cosmos, como en la actualidad sí lo hace la energía oscura «ordinaria». No obstante, habría provocado que el plasma que emergió de la gran explosión se enfriara más rápido. Y eso afecta a la manera en que deben interpretarse los datos del fondo cósmico de microondas, sobre todo en lo relativo a sus implicaciones sobre la edad del universo y la tasa de expansión.

Dichas implicaciones se basan en la distancia que las ondas acústicas pudieron recorrer a través del plasma antes de que este se enfriara y se convirtiera en gas. Para realizar dichos cálculos, Planck y otros observatorios similares analizan ciertos patrones que quedaron «grabados» en el cielo cuando esa transición tuvo lugar. Los dos trabajos presentados ahora han hallado que las observaciones del ACT relativas a la polarización del fondo de microondas se ajustarían mejor a un modelo con energía oscura temprana que al modelo cosmológico estándar.

Interpretar el fondo de microondas sobre la base de un modelo con energía oscura temprana y los datos del ACT implicaría que la edad actual del universo es de 12.400 millones de años: en torno a un 10% menos que los 13.800 millones de años que predice el modelo estándar, apunta Hill. Como consecuencia, la tasa de expansión actual sería en torno a un 5% mayor que la que arroja el modelo estándar, lo que la acercaría al valor que revelan otras mediciones.

Incongruencias por resolver

Hill confiesa que un principio era escéptico hacia la idea de energía oscura temprana, por lo que los hallazgos de su grupo lo sorprendieron. Vivian Poulin, astrofísica de la Universidad de Montpellier y coautora del segundo trabajo sobre los datos del ACT, comenta que fue tranquilizador comprobar que el análisis de su grupo coincidía con el del equipo del ACT. «Los autores principales son personas muy duras y muy conservadoras, que realmente comprenden los datos y las mediciones», señala Kamionkowski.

Con todo, Galli advierte que los datos del ACT parecen ser incompatibles con los cálculos del equipo de la misión Planck, del cual ella formó parte. Y aunque las medidas de polarización del ACT podrían apoyar la hipótesis de la energía oscura temprana, no está claro si el otro gran conjunto de datos (los relativos a la temperatura del fondo cósmico) apunta al mismo resultado. Por todo ello, agrega, será clave verificar el hallazgo con los datos del Telescopio del Polo Sur, un experimento del que ella forma parte.

Wendy Freedman, astrónoma de la Universidad de Chicago que ha llevado a cabo algunas mediciones más precisas sobre la tasa de expansión cósmica, opina que los resultados basados en los datos del ACT son interesantes, aunque también preliminares. «Es importante proponer modelos diferentes» y compararlos con el estándar, concluye la experta.

Davide Castelvecchi *es periodista científico especializado en física, astronomía y matemáticas de la revista* Nature.

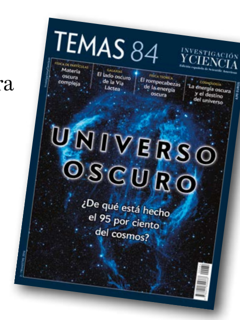
Artículo original publicado en *Nature* vol. 597, págs. 460-461, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Universo oscuro*, uno de los monográficos de nuestra colección TEMAS, donde podrás encontrar una panorámica clara y rigurosa sobre el estado actual de la investigación sobre materia y energía oscuras.





PARA SABER MÁS

Early dark energy can resolve the Hubble tension. Vivian Poulin et al. en *Physical Review Letters*, vol. 122, art. 221301, junio de 2019.
The Atacama Cosmology Telescope: Constraints on pre-recombination early dark energy. J. Colin Hill et al. en arXiv:2109.04451, 9 de septiembre de 2021.
Dark energy at early times and ACT: A larger Hubble constant without late-time priors. Vivian Poulin, Tristan L. Smith y Alexa Bartlett en arXiv:2109.06229, 13 de septiembre de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La sinfonía cósmica. Wayne Hu y Martin White en *IyC*, abril de 2004.
El problema de la constante de Hubble. Dominik J. Schwarz en *IyC*, marzo de 2019.
La crisis en torno a la constante de Hubble. Richard Panek en *IyC*, mayo de 2020.
El problema de la constante cosmológica. Clara Moskowitz en *IyC*, abril de 2021.

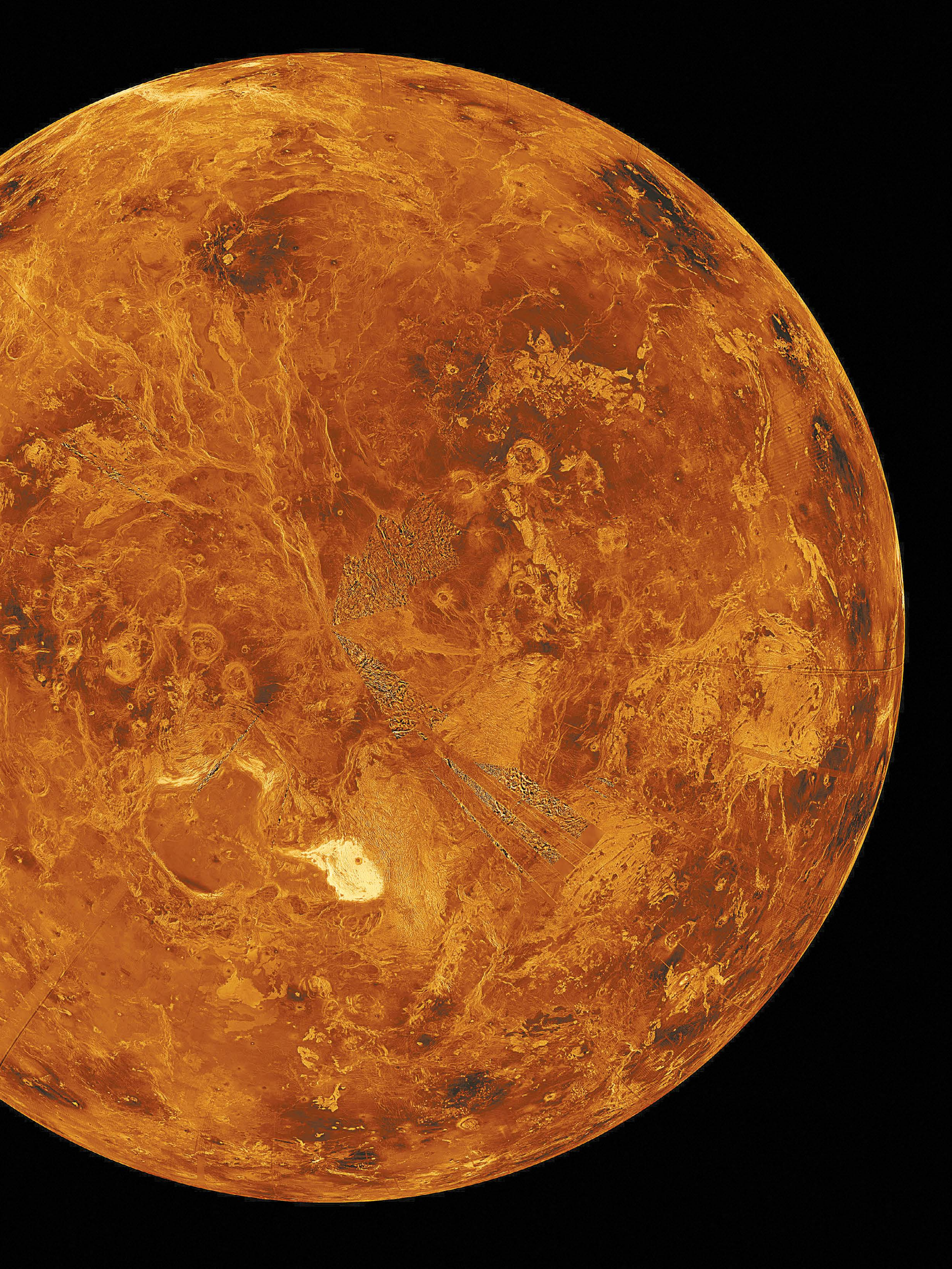
SISTEMA SOLAR

Regresar a Venus

Tras décadas de abandono, tres nuevas misiones se han propuesto volver al largamente olvidado gemelo infernal de la Tierra

Robin George Andrews

VISTA GLOBAL DEL HEMISFERIO NORTE DE VENUS basada en los datos de radar del orbitador Magallanes, de la NASA. Esta nave atisbó bajo el remolino de nubes del planeta entre 1990 y 1994.



Robin George Andrews es vulcanólogo y periodista científico. Es autor de *Super volcanoes: What they reveal about Earth and the worlds beyond* (W. W. Norton, 2021).



Como muchos niños, Sue Smrekar soñaba con viajar algún día al espacio. Pero en vez de convertirse en astronauta, acabó siendo geofísica planetaria en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA y trabajando en los exploradores robóticos de otros mundos. En cierto modo, su destino interplanetario parecía fijado incluso desde antes de nacer: su padre procede de una comunidad rural de Pensilvania llamada Venus.

EN SÍNTESIS

Durante las últimas décadas, Venus ha sido el gran olvidado de la exploración espacial. Sin embargo, aún persisten numerosas preguntas sobre nuestro planeta vecino, muy similar en muchos aspectos a la Tierra.

Una de ellas es qué hizo que Venus se convirtiera en el mundo infernal que actualmente es. Resolver esa pregunta no solo iluminaría la historia del sistema solar, sino que ayudaría a investigar la habitabilidad de varios exoplanetas.

Tras años mirando a Marte, la NASA y la ESA han aprobado este año tres misiones a Venus. Durante la década de 2030, VERITAS, DAVINCI+ y EnVision estudiarán con un detalle sin precedentes la atmósfera y la superficie de nuestro planeta vecino.

Curiosamente, la primera misión en la que trabajó Smrekar fue la de un orbitador en torno a Venus: la sonda Magallanes, de la NASA. Lanzada en 1989, esta misión contaba con un sistema de radar que oteó bajo las espesas nubes del planeta para cartografiar por vez primera toda su superficie. Smrekar recuerda el momento en que comenzaron a llegar las imágenes de radar, las cuales revelaban un mundo extraño cubierto por unos pocos cráteres, una miríada de volcanes y llanuras onduladas de lava congelada. Los datos de Magallanes avivaron la que se ha convertido en una de las mayores preguntas abiertas de las ciencias planetarias: ¿qué llevó a Venus, el segundo planeta más cercano al Sol y casi un gemelo de la Tierra en cuanto a su tamaño y composición, a un esta-

PÁGINAS ANTERIORES: NASA Y JPL; ©TED STRYK, DATOS BRUTOS CORTESÍA DE LA ACADEMIA RUSA DE LAS CIENCIAS (*abajo*)

do tan apocalíptico? ¿Por qué dos planetas vecinos y similares poseen historias tan asombrosamente divergentes?

La exploración de Magallanes concluyó en 1994, y desde entonces la NASA no ha vuelto a enviar una misión específica a Venus. Pero justo cuando Smrekar y sus colaboradores comenzaban a abordar los misterios recién desvelados del planeta, unas sensacionales afirmaciones sobre la posible existencia de vida en Marte atraparon al público. Hoy, un cuarto de siglo después, gran parte de la comunidad global de planetólogos sigue enfrascada en la hasta ahora infructuosa búsqueda de vida marciana. Entretanto, Venus —un páramo ácido, abrasador, árido y presumiblemente sin vida— cayó en el olvido.

Eso cambió el pasado junio, cuando la NASA anunció las nuevas misiones interplanetarias que había seleccionado para formar parte de su programa Discovery. La agencia había tomado en consideración cuatro misiones: una para visitar una luna de Neptuno, otra que planeaba un encuentro con un satélite joviano, y dos proyectos independientes, denominados DAVINCI+ y VERITAS, que pretendían retornar a Venus.

«Deseamos con todas nuestras fuerzas romper la "maldición de Venus"», manifestó Smrekar, investigadora principal de VERITAS, antes del anuncio. Ella y sus colegas esperaban que la NASA diera luz verde a una única misión a Venus. En cambio, y para sorpresa de Smrekar, la agencia recompensó tanto a VERITAS como a DAVINCI+. Las dos misiones son complementarias y están diseñadas para estudiar la habitabilidad pasada del planeta. Por primera vez en tres décadas, la NASA había decidido volver a Venus. Y no una, sino dos veces.

Las buenas noticias siguieron llegando. Apenas una semana después de la esperada decisión de la NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) proclamó que EnVision, un orbitador diseñado para realizar estudios científicos en determinadas regiones del planeta, se uniría a la exploración. Había comenzado el renacimiento de Venus.

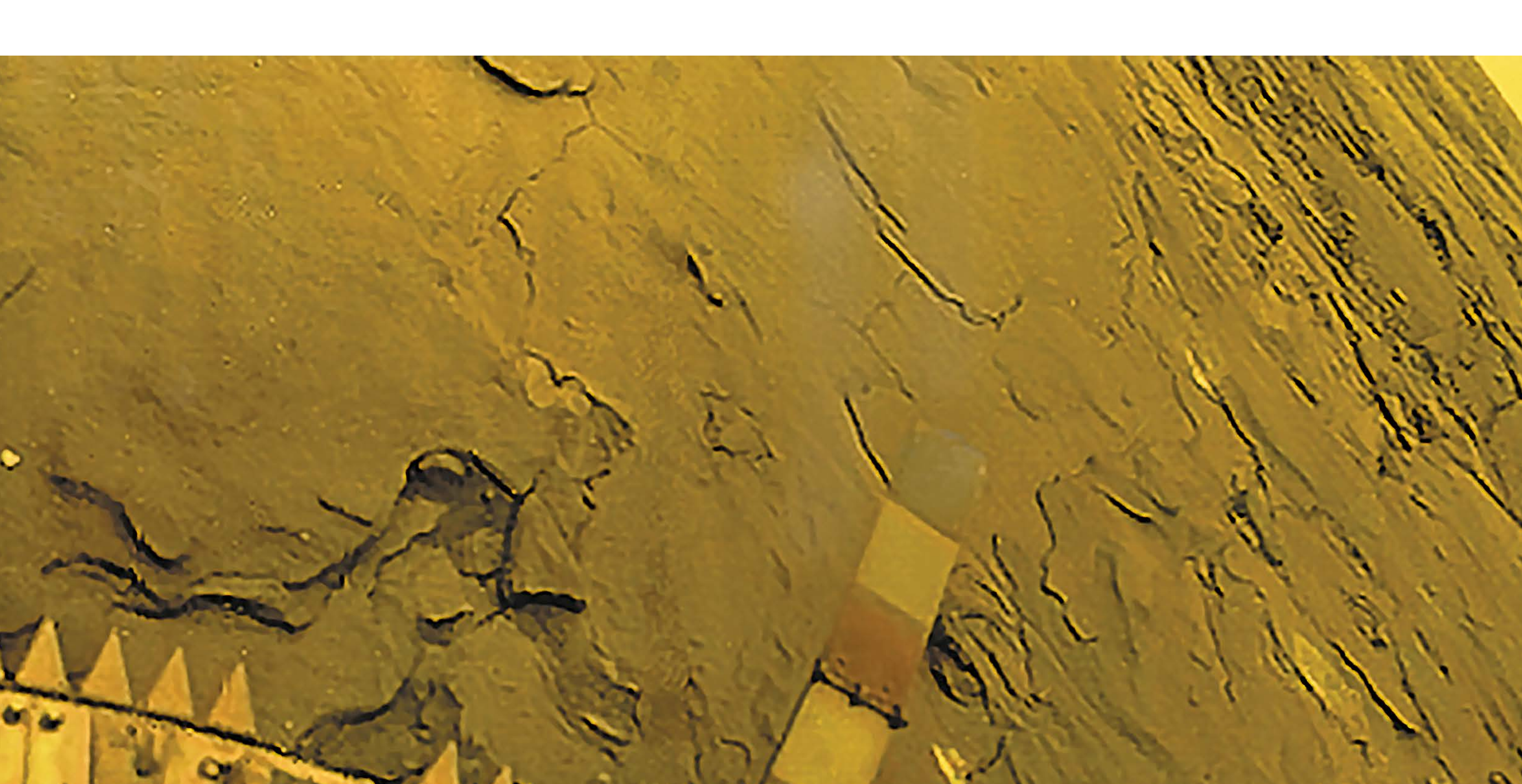
DAR LA ESPALDA AL DIABLO

A principios de año no estaba nada claro que Venus fuera a recobrar su protagonismo. La historia parecía sugerir que su tiempo ya había pasado. Durante los años sesenta y setenta, Venus representó una especie de frente interplanetario de la Guerra Fría, ya que tanto EE.UU. como la Unión Soviética enviaron allí varias misiones. Pero con cada nueva incursión quedaba más claro lo terriblemente inadecuado que resultaba el planeta para la futura exploración humana.

La espesa y asfixiante atmósfera de Venus contiene en torno a un 95 por ciento de dióxido de carbono. Sus capas de nubes están repletas de ácido sulfúrico, suficiente para atravesar en un instante la piel, los huesos y el metal. En la superficie escaparíamos de la corrosiva lluvia ácida, pero solo porque allí abajo es imposible que llueva: el suelo se cuece a casi 500 grados Celsius, una temperatura lo bastante alta para achicharrar a cualquier astronauta o robot. Y aunque presentásemos una resistencia prodigiosa al calor, aún habríamos de lidiar con una presión superficial 90 veces mayor que la de la Tierra, o similar a la que experimentaríamos a un kilómetro bajo el agua. No importa qué parte del planeta visitáramos. Sufriríamos una muerte rápida pero atroz.

Desde que acabó la misión Magallanes, Venus ha estado bastante solo. La nave Venus Express, de la ESA, estuvo orbitando a su alrededor entre 2006 y 2014. La sonda japonesa Akatsuki, que entró en órbita en 2015, sigue aún allí, estudiando la atmósfera venusiana y tratando de detectar sus esquivos relámpagos. Si fuera por Paul Byrne, planetólogo de la Universidad Estatal de Carolina del Norte y entusiasta declarado de Venus, hoy habría multitud de naves espaciales sobrevolando el planeta o aterrizando en él. En cambio, lamenta, Venus es un mundo del que casi nadie se ha preocupado en los últimos 30 años.

El punto de inflexión se produjo en 1996, cuando un grupo de reputados científicos publicó un artículo que anunciaba el hallazgo de fósiles microscópicos en ALH 84001, un meteorito de origen marciano. El entonces presidente de EE.UU., Bill Clinton, pronunció un discurso sobre el descubrimiento en la Casa Blanca y comunicó al mundo que el programa espacial estadounidense



LAS IMÁGENES DE LA SUPERFICIE, como esta panorámica que tomó en 1982 el módulo de aterrizaje soviético Venera 14, apenas revelan sombríos paisajes de rocas volcánicas bajo un cielo agobiante y corrosivo.

dedicaría «toda su capacidad intelectual y tecnológica a la búsqueda de nuevos indicios de vida en Marte».

Al final, el hallazgo no resultó tan revolucionario. Otros estudios, realizados con mucho menos bombo y platillo, indicaron que los «microfósiles» bien podrían ser formaciones minerales totalmente abióticas. Pero el sueño de encontrar vida resultaba demasiado atractivo para desecharlo. Multitud de misiones comenzaron a llegar al planeta rojo, cada una de las cuales se basó en los éxitos de sus predecesoras y reforzó el atractivo de Marte como principal destino de la exploración planetaria. «No pretendo decir que Marte tenga subyugado al público», comenta Byrne, «aunque en cierto modo es así». A menudo bromea con que le gustaría destruir Marte, como cuando la Estrella de la Muerte destruye el planeta Alderaan en *La guerra de las galaxias*, para que todo el mundo tuviera que volver a pensar en Venus. Solo lo dice medio en broma.

Sin embargo, aunque Marte desapareciera del firmamento, aún quedaría el problema de que Venus es un prolífico destructor de naves espaciales. Los orbitadores sobreviven sin problemas, pero para estudiar la superficie se requiere un potente radar capaz de penetrar las densas nubes que la cubren. En cambio, Marte, con una atmósfera más tenue y transparente, y con una superficie fría y seca que solo sufre tormentas de polvo globales en contadas ocasiones, «es el lugar ideal para realizar exploraciones exhaustivas de la superficie», admite Byrne. Pero ¿es Marte más valioso que Venus para la ciencia? «No lo creo ni por asomo», zanja.

Un punto en contra de Marte es su tamaño. Con tan solo una sexta parte del volumen de nuestro planeta y una décima parte de su masa, no se parece demasiado a la Tierra. Al menos comparado con Venus, que en ese sentido es casi nuestro gemelo planetario. Por supuesto, el hecho de que el ambiente venusiano destruya las naves espaciales supone un problema. Se están desarrollando componentes electrónicos resistentes al calor que puedan soportar ese infierno y permitan explorar el planeta *in situ*, pero todavía no existe ninguna solución para lograr que una misión sobreviva más de un par de horas en la superficie de Venus. Aun así, según Byrne, el gran parecido de Venus con nuestro planeta lo convierte en la mejor opción para investigar cómo surgen —y cómo desaparecen— los mundos similares a la Tierra. «Venus nos lo pondrá difícil», advierte Byrne. «Pero esa no es razón para no intentarlo.»

INDAGADORES, ARTISTAS Y VISIONARIOS

El programa de misiones interplanetarias Discovery de la NASA tiene fama de ser relativamente económico (con un coste de unos 600 millones de dólares por proyecto), pero también profundamente desgarrador. Los equipos de científicos e ingenieros suelen trabajar juntos varios años para desarrollar propuestas muy detalladas que luego evalúan los altos funcionarios de la agencia espacial. El proceso de selección es tan competitivo como despiadado, y genera decenas de perdedores por cada ganador, al tiempo que dicta qué regiones del sistema solar se explorarán. Las misiones VERITAS y DAVINCI+ no obtuvieron sus codiciados puestos en el programa Discovery apelando a los sentimientos. Cada uno de estos proyectos constituye un hito tecnológico, diseñado y perfeccionado para responder las preguntas más candentes de los planetólogos sobre nuestro inhóspito vecino.

VERITAS (que significa «verdad» en latín y es el acrónimo en inglés de Emisividad, Radiociencia, Interferometría SAR, Topografía y Espectroscopía de Venus) será en muchos sentidos una continuación de Magallanes: un orbitador con un sistema de radar de última generación que trazará el mapa más pormenorizado del planeta hasta la fecha. Reemplazará los antiguos mapas de Magallanes por espléndidas cartas topográficas tridimensionales repletas de detalles, desde volcanes individuales y sus paisajes cubiertos de lava hasta sistemas de fallas que atraviesan el terreno cuales cicatrices.

VERITAS también observará en el infrarrojo, lo que le permitirá distinguir minerales concretos en la superficie a partir de su emisión térmica característica. Pero el trabajo del orbitador no será solo superficial. Otro de sus instrumentos explorará las entrañas del planeta y cartografiará la intensidad variable de su campo gravitatorio para visualizar la estructura de capas del interior de Venus. Según Smrekar, está misión por fin proporcionará una imagen de alta fidelidad del planeta, similar a los detallados conjuntos de datos que ya existen desde hace tiempo sobre la Luna y Marte.

DAVINCI+ (Investigación de Gases Nobles, Química e Imágenes de la Atmósfera Profunda de Venus Plus, por sus siglas en inglés) lleva el nombre del maestro del Renacimiento. Su director es Jim Garvin, científico jefe del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA. Al igual que Smrekar, Garvin ama Venus y rehúye con humildad de todo protagonismo. En una ocasión en la que le pidieron que compartiera alguna curiosidad sobre sí mismo, Garvin replicó que probablemente era «demasiado aburrido».

No ocurre lo mismo con el proyecto que ha diseñado su equipo, una grandiosa empresa que dejará caer una sonda en las fauces venusianas por primera vez desde la misión Pioneer Venus de 1978. La sonda atravesará la atmósfera e irá atrapando y analizando las sustancias que la componen durante su viaje deliberadamente mortal. A medida que se aproxime a la superficie y se disipen las nubes, tomará imágenes con una resolución sin precedentes de Alpha Regio, un área montañosa y geológicamente compleja del planeta. Mientras, sus detectores infrarrojos estudiarán la mineralogía del terreno. La sonda sucumbirá al poco de tomar tierra, pero no antes de transmitir los datos obtenidos durante su descenso en paracaídas.

Puede que esa sonda constituya el plato fuerte, pero DAVINCI+ también contará con un orbitador. Carecerá de un sistema de radar avanzado, pero sus cámaras examinarán la atmósfera y la superficie en el ultravioleta y el infrarrojo, lo que ampliará los datos que tome VERITAS. El principal objetivo de la misión será determinar de una vez por todas si el clima de Venus siempre fue tan hostil. «Hemos diseñado DAVINCI+ para abordar esa cuestión», confirma Garvin.

El tercer miembro del contingente venusiano, la misión EnVision de la ESA, empleará sus sistemas de radar para cartografiar la superficie de nuestro vecino mientras sus espectrómetros ultravioleta e infrarrojo analizarán la composición de las rocas y de la atmósfera. También llevará a cabo un experimento de radio para detectar las mínimas variaciones en el campo gravitatorio del planeta y generar una imagen de su interior. Igual que sucede con VERITAS, algunos de los estudios de EnVision tendrán carácter global. Sin embargo, su punto fuerte será su capacidad de dirigir rápidamente su atención a determinadas zonas de interés en respuesta a las necesidades cambiantes de los científicos.

«Venus siempre me cautivó», reconoce Richard Ghail, geólogo planetario de la Universidad de Londres y científico principal de EnVision. Al igual que sus homólogos estadounidenses, él también quería descubrir «cómo se comportan los planetas del

tamaño de la Tierra en distintas condiciones». Y a tal fin, ¿qué mejor lugar para explorar que nuestro vecino maldito?

LAS MUCHAS MUERTES DE VENUS

La pista más reveladora sobre la historia cataclísmica de Venus es el alto contenido en agua pesada de su atmósfera, un hallazgo que debemos a la sonda que liberó en 1978 la misión Pioneer. El agua pesada es una versión exótica del H_2O que, en vez de hidrógeno ordinario, posee deuterio (átomos de hidrógeno con un neutrón adicional). Al ser más pesada que el agua ordinaria, resulta más difícil que se evapore y se pierda en el espacio. Se cree que la sobreabundancia de agua pesada en Venus se debe a los restos de un océano de agua normal que hace eones cubría el planeta. Para entender qué le ocurrió a Venus, habría que averiguar qué sucedió con toda esa agua. Garvin sostiene que no debemos contemplar el planeta como un pandemonio infernal, sino como «un mundo oceánico que perdió sus océanos». Pero ¿cómo ocurrió eso?

La falta de datos hace que esa pregunta, como tantas otras sobre Venus, carezca de una respuesta concluyente. Pero eso no ha impedido que los científicos elaboren hipótesis y piensen en cómo podrían confirmarlas con misiones como VERITAS y DAVINCI+. En los últimos años, Michael Way, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, ha estudiado junto con sus colaboradores los posibles pasados de Venus mediante detalladas simulaciones por ordenador.

Según sus modelos, el lento pero constante aumento de brillo del Sol recién nacido pudo condenar a Venus en sus albores, al calentar el joven planeta de forma tan intensa que el agua solo podría haber existido en forma de vapor. Todo ese vapor de agua —un potente gas de efecto invernadero— habría elevado rápidamente la temperatura, un efecto que se habría sumado al del dióxido de carbono procedente de un océano de magma de tamaño planetario. Si el Sol ejerció de villano en la historia climática de Venus, entonces el planeta estaba «sentenciado desde el principio», asegura Way.

Pero si la temprana intensificación del joven Sol no hubiera tenido la culpa, esta podría recaer sobre algún otro agente. Way sospecha de los volcanes. Al igual que las estrellas, los volcanes influyen en todo lo que sucede en la superficie de un planeta, desde la evolución de la atmósfera hasta el destino de los océanos.

A lo largo de la historia de la Tierra, diversas erupciones de lava a escala continental arrojaron al cielo enormes cantidades de gases de efecto invernadero durante cientos de miles o incluso millones de años, lo cual desencadenó las extinciones masivas o contribuyó a ellas. En nuestro planeta, esas inmensas erupciones han acaecido de forma aislada —hasta ahora— y cada una de ellas ha quedado registrada como una perturbación en la historia geológica. Pero si en Venus se hubieran producido varias al mismo tiempo, podrían haber liberado tanto dióxido de car-

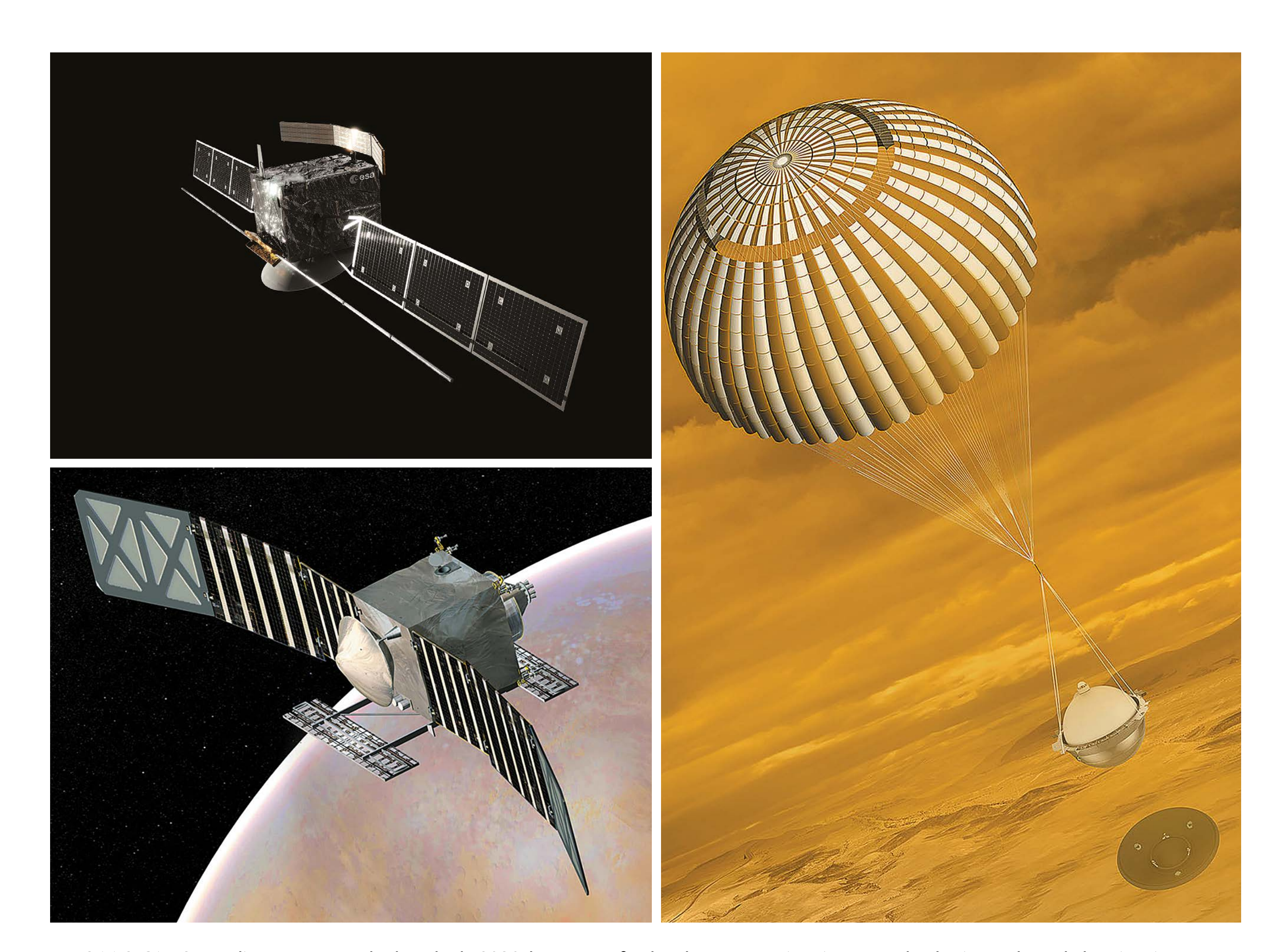
ATMÓSFERA

Venus al descubierto

Las infernales condiciones de Venus son el resultado de un cambio climático extremo. Este fue causado por una ingente liberación de gases de efecto invernadero, los cuales se cree que se expulsaron en el transcurso de erupciones volcánicas ocurridas hace eones. Pero, a diferencia del resto del planeta, una cierta región de la atmósfera presenta condiciones curiosamente benignas, quizá incluso aptas para la vida. Tras años de abandono, en los próximos años tres nuevas misiones intentarán dar respuesta a este y a otros muchos interrogantes que aún persisten sobre el planeta vecino.



5W INFOGRAPHICS (gráfico)



TRES MISIONES estudiarán Venus en la década de 2030, lo que por fin devolverá este misterioso mundo al primer plano de las ciencias planetarias. La nave espacial VERITAS, de la NASA (*izquierda, abajo*), creará los mapas infrarrojos y de radar más detallados hasta la fecha, al tiempo que estudiará el interior del planeta. La misión DAVINCI+, también de la NASA, observará el planeta en el ultravioleta y el infrarrojo y liberará una sonda atmosférica (*derecha*). Y la nave EnVision, de la ESA (*izquierda, arriba*), escudriñará Venus con instrumentos de radar, infrarrojos y ultravioletas y destacará por su capacidad para dirigir rápidamente su atención a puntos concretos de la superficie.

MS ENVISION DESIGN GRAPHICS ©VR2PLANETS (*EnVision*); NASA Y GSFC (*DAVINCI+*); NASA Y JPL-CALTECH (*VERITAS*)

bono que los océanos habrían comenzado a evaporarse, llenando la atmósfera de vapor de agua (que también atrapa el calor) y desencadenando un inevitable ciclo de retroalimentación que habría calcinado el planeta.

Entonces, ¿qué ocurrió? DAVINCI+ podrá ayudar a determinar cuándo perdió Venus su agua gracias a su capacidad para examinar los gases nobles de la atmósfera, como el xenón, el argón o el helio. Hay varias versiones de cada gas —algunas más pesadas, otras más ligeras— y los científicos conocen el origen de cada una de ellas. Por ejemplo, el helio-3 proviene de las profundidades de un planeta. Pero el helio-4, un isótopo más pesado, surge en las desintegraciones radiactivas que se producen en la corteza. Al igual que esta pareja, en la atmósfera puede haber distintas variedades de otros gases nobles. Y lo que es más importante: estos gases no reaccionan con otros compuestos de interés geofísico, como el dióxido de carbono o el agua, lo que los convierte en «mensajes con matasellos» que revelan no solo su procedencia, sino también cómo y cuándo llegaron al cielo de Venus.

Tales mediciones podrían indicar que Venus estuvo totalmente seco desde el principio, algo que señalaría al joven Sol como responsable de abrasar el planeta. Sin embargo, si el Sol no se hubiera iluminado tan deprisa durante su infancia, el océano de magma del planeta debería haberse congelado, permitiendo que el agua líquida se formara y acumulara en la superficie. Venus podría haber sido un mundo tropical con ríos, lagos, mares y océanos. A Martha Gilmore, geóloga planetaria de la Universidad Wesleyana de Connecticut que participa tanto en DAVINCI+ como en VERITAS, le entusiasma la idea. «No hay ninguna razón, a partir de lo que sabemos sobre los planetas, para que Venus no fuera habitable en sus primeros tiempos», afirma.

En este momento, la posibilidad que suscita más consenso es que las enormes erupciones acabaron con los océanos de Venus. Eso podría haber ocurrido enseguida, pero tal vez DAVINCI+ revele que Venus fue un mundo acuático hasta bien entrada su adolescencia planetaria. «Creo que la gran pregunta sobre Venus es: ¿hubo océanos en su superficie durante miles de millones de años?», apunta Joseph O'Rourke, planetólogo de la Universidad Estatal de Arizona. Puede que, durante gran parte de su existencia, Venus fuera otro punto azul pálido en órbita alrededor del Sol. Un paraíso perdido.

Si Venus fue un mundo acuático durante eones, también debería haber tenido tectónica de placas. Este proceso, que crea montañas, cuencas y volcanes, actúa además como termosta-

to planetario. El dióxido de carbono atmosférico se disuelve en los océanos, donde queda atrapado en las placas tectónicas que se sumergen en el manto caliente situado bajo la corteza. Con el tiempo, el gas de efecto invernadero vuelve a liberarse y fluye a la superficie y luego al cielo, en una serie de erupciones volcánicas alimentadas por el magma profundo. Gran parte de la estabilidad climática a largo plazo de un planeta terrestre se debe a este ciclo del carbono. En Venus, los sistemas de radar de EnVision y VERITAS podrían identificar fallas antiguas o activas, signos de que en algún momento tuvo lugar ese ciclo que determina la habitabilidad.

Ambas misiones examinarán también las *tesserae*, extrañas mesetas similares a continentes que salpican la superficie de Venus. La mayor parte del planeta está cubierta por flujos de lava, los cuales debieron manar mucho después del épico vulcanismo que podría haber evaporado el agua y alterado el clima. Se cree que las *tesserae*, que se elevan por encima de estos flujos de lava, constituyen las rocas más antiguas de Venus. «Podrían tener 500 millones o 4000 millones de años, no lo sabemos», admite Gilmore.

Los científicos no solo desconocen la antigüedad de esas mesetas, sino que tampoco saben qué son. Si realmente se trata de rocas continentales parecidas a las de la Tierra, habrían necesitado mucha agua para formarse, lo que sería una prueba concreta de que Venus fue una vez un mundo acuático. «Eso dejaría a la gente boquiabierta», opina O'Rourke. Si las *tesserae* poseen estratos, como han propuesto recientemente Byrne y sus colaboradores, podrían ser de origen sedimentario y conservar indicios de antiguos ríos y lagos. Otra posibilidad es que sean capas de lava, tal vez restos del antiguo vulcanismo global que destruyó el cielo.

Según O'Rourke, la sonda de DAVINCI+ obtendrá una vista muy cercana y detallada de una sola de esas mesetas. «Ni siquiera sabemos si todas son iguales, así que elegir una es una lotería», comenta. «Pero DAVINCI+ tomará magníficas imágenes geológicas a escala humana que no es posible adquirir desde una órbita.» Por su parte, VERITAS proporcionaría un mapa de todas las mestas, aunque con menor detalle, y EnVision escogería varias para estudiarlas minuciosamente desde lo alto.

El mapa dinámico de Venus que trazará VERITAS, que permitirá distinguir cambios al fotografiar varias veces un mismo punto de la superficie, también podría mostrar que el planeta aún presenta vulcanismo activo. Se trata de una creencia muy arraigada y respaldada por numerosos indicios circunstanciales, si bien hasta ahora nadie ha presenciado ninguna prueba irrefutable de una erupción en directo. «Encontrar un volcán activo sería increíble», valora Smrekar. EnVision también podría ayudar en esa búsqueda al detectar el rastro de la columna de gases expulsada por un volcán en erupción o el calor que desprendería una montaña llena de magma.

Confirmar si se sigue produciendo un proceso planetario tan importante no es una mera comprobación rutinaria. Como cualquier actividad tectónica tumultuosa y transformadora, el vulcanismo es impulsado por lo que ocurre en las profundidades de un planeta. Captar volcanes en erupción proporcionaría una ventana al oscuro corazón geológico de Venus y permitiría a los científicos compararlo con el del de la Tierra en cuanto a su cadencia.

Y mientras DAVINCI+ determinará cuánta agua ha perdido Venus, EnVision establecerá cuánta conserva aún. «¿Todavía queda agua dentro del planeta?», se pregunta Ghail. Al detectar las columnas de gas emitidas por sus volcanes y establecer su contenido en H_2O, los científicos podrían saber si el interior de Venus está tan seco como su exterior.

TIEMPOS DE ESPERANZA Y MIEDO

Al igual que EnVision, VERITAS y DAVINCI+ distan mucho de ser propuestas precipitadas. Los diseños de ambas misiones comenzaron a bosquejarse hace más de un decenio. (Dos versiones de ellas quedaron finalistas en la última convocatoria del programa Discovery, celebrada en 2017, pero se vieron superadas por Psyche y Lucy, dos proyectos para investigar asteroides.) Cada una de esas propuestas descansa sobre más de 50 años de estudios científicos. Ha sido un viaje largo y estresante para todos los implicados.

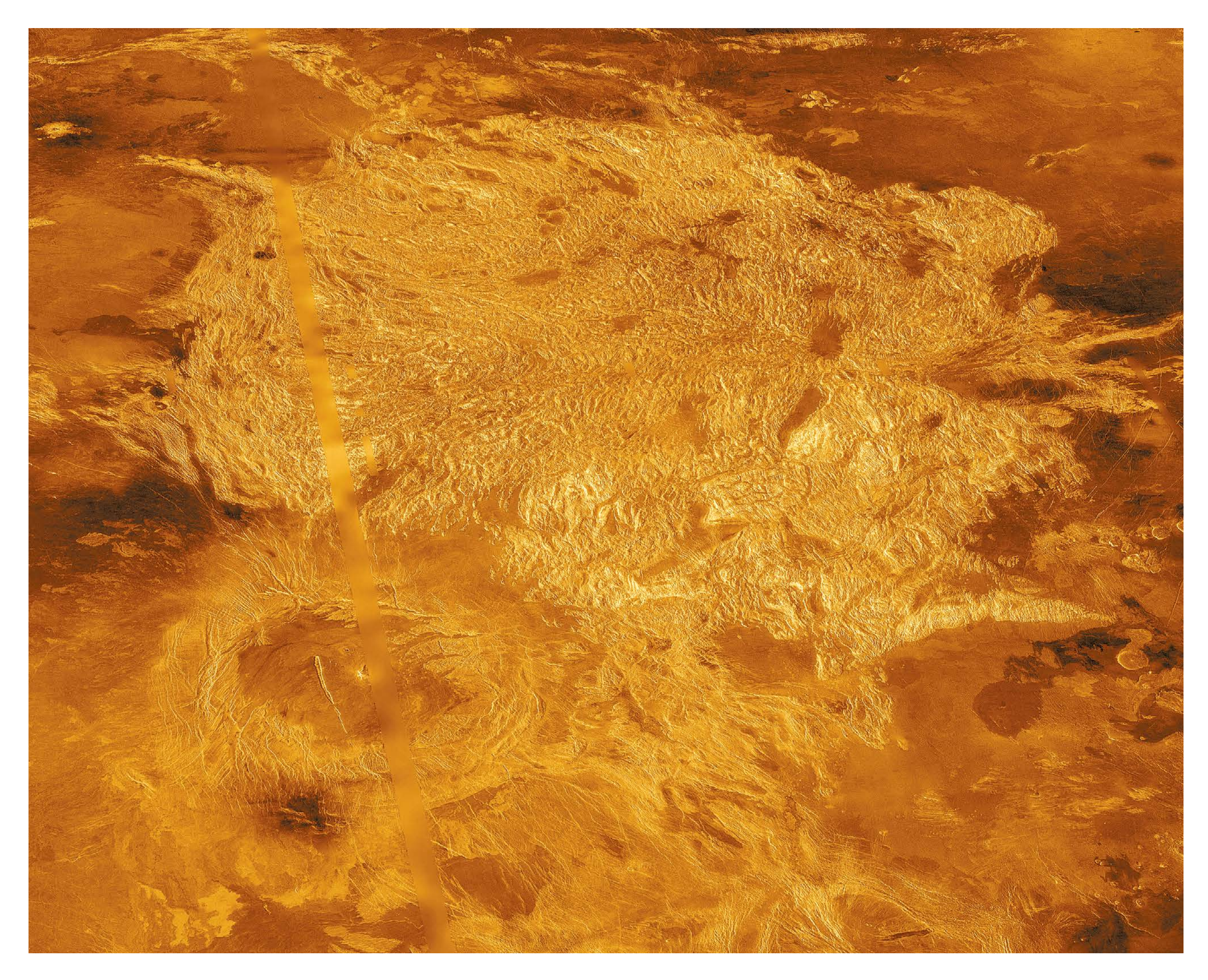
A medida que se acercaba el reciente anuncio del programa Discovery, se disparó la tensión. Los primeros meses de 2021 fueron una experiencia especialmente agotadora para los equipos de ambas misiones, que trabajaron sin descanso para impresionar a los jueces que decidirían su futuro. «Haría falta una novela para describir el esfuerzo que hemos hecho en el último año», asegura Smrekar. El estudio conceptual que su equipo presentó el pasado noviembre tenía «casi tantas páginas como *Guerra y paz*».

En el pasado, Venus pudo haber sido un mundo tropical con ríos, lagos, mares y océanos. No hay ninguna razón para que no fuera habitable en sus primeros tiempos

Perseverar durante la pandemia también les pasó factura psicológica. «Los equipos trabajan codo con codo. Se convierten en una pequeña familia, especialmente en el contexto de la COVID», afirma Smrekar. «Siento un inmenso agradecimiento y admiración por todos aquellos que tuvieron que cuidar a sus hijos pequeños o a personas mayores en casa durante este último año.»

VERITAS y DAVINCI+ se enfrentaban a dos proyectos excepcionales. Uno era el Observador de los Volcanes de Ío, o IVO, que habría visitado la luna joviana, el astro más volcánico conocido y el mejor lugar para entender cómo las mareas gravitacionales pueden preservar la actividad geológica mucho más allá de nuestras ingenuas estimaciones sobre su fecha de caducidad. La otra propuesta, Trident, se habría dirigido a Tritón, la luna de Neptuno, una reliquia del sistema solar exterior que se mantiene sorprendentemente joven gracias a una forma de criovulcanismo que los científicos apenas han visto.

Si nos atenemos a sus méritos, cada uno de esos cuatro proyectos tenía excelentes opciones de salir victorioso. Pero para que uno o varios ganen, es preciso que otros pierdan. Y al sopesar las probabilidades, es imposible ignorar un hecho que aconteció el 14 de septiembre de 2020 y que bien pudo haber inclinado la balanza a favor de Venus: un equipo de científicos anunció que había detectado fosfano en las nubes del planeta, a una cierta altura donde la temperatura y la presión serían compatibles con la existencia de gotas de agua líquida.



NASA Y JPL

ALPHA REGIO, una franja de la superficie de Venus de 1500 kilómetros de ancho, se caracteriza por sus montañas extrañamente deformadas y sus llanuras volcánicas. Es el lugar donde está previsto que aterrice la sonda de la misión DAVINCI+.

El vulcanismo y los relámpagos pueden generar fosfano. Pero, al menos en la Tierra, también pueden producirlo los microorganismos, por lo que aquello planteó la posibilidad de que el hallazgo constituyera una prueba indirecta de la existencia de vida extraterrestre. En un abrir y cerrar de ojos, se disparó el interés —del público, los medios de comunicación y la comunidad científica— por el fosfano y por Venus.

Desde entonces, la detección se ha puesto en duda y han aparecido distintos análisis que la corroboran o la refutan. En última instancia, el hecho de que haya o no fosfano y de que esté relacionado con la presencia de microorganismos no es lo único que pudo influir en la decisión de la NASA. La controversia también puso de manifiesto algo importante: existe una región global en las nubes de Venus que no es ni demasiado caliente ni demasiado ácida para descartar la posibilidad de que prosperen allí microbios autóctonos que se hayan adaptado a vivir en esas condiciones.

En la Tierra, los científicos no dejan de encontrar microorganismos que proliferan, sobreviven o permanecen inactivos en lugares letales para plantas y animales. La superficie de Marte es un desierto frígido, expuesto a la radiación y hostil para la vida. Pero los microbios podrían hallar un hogar en el subsuelo, posiblemente más cálido y húmedo. Al igual que Marte, Venus ayuda a redefinir el significado de habitabilidad. «Un planeta infernal no tiene por qué ser inhóspito en todos los sentidos», explica Clara Sousa-Silva, astroquímica del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard e integrante del equipo que anunció el descubrimiento del fosfano.

Aunque se ha sugerido que la sonda de DAVINCI+ podría detectar el fosfano durante su caída, ni esta misión, ni VERITAS ni EnVision han sido diseñadas para estudiar el compuesto químico de moda. Pero las tres podrían ayudar a acotar el resto de los fenómenos planetarios capaces de producir fosfano, desde el vulcanismo hasta los procesos atmosféricos. En cualquier caso, quizá lo más relevante sea que el fosfano le ha conferido a Venus un plus de popularidad similar al que logró Marte en 1996 gracias a un meteorito de aspecto sospechoso. «Para nosotros [el fosfano] es la guinda del pastel», dice Gilmore, «porque Venus es atractivo con independencia de la vida».

Smrekar y Garvin lo saben mejor que nadie. Ambos son veteranos de Venus desde antes de Magallanes. Los dos buscaban respuestas a sus persistentes preguntas; hacerse con la fruta madura que, para su frustración, ha colgado al alcance de la mano durante décadas sin que nadie la recogiera. Mientras los

científicos centrados en Marte frecuentaban las salas de control de las misiones y estallaban en vítores cada vez que otro robot se unía a sus compañeros en ese mundo oxidado, los partidarios de Venus han trabajado y esperado. Se torturaban con la idea de que tal vez en esa ocasión, por fin, la NASA seleccionaría una misión para volver a nuestro planeta vecino. «Llevo nervioso los últimos 41 años», proclamó Garvin poco antes del anuncio del programa Discovery. «Decir que estábamos nerviosos es quedarse corto», admite Smrekar respecto a su propio equipo. «Los que estamos muy implicados en la misión hemos puesto toda nuestra ilusión, nuestro ingenio y nuestros fines de semana para hacerlo posible.»

Una derrota habría supuesto un duro golpe para cualquiera de los dos equipos. Si la NASA no hubiera elegido ninguna de las dos misiones, muchos habrían percibido la decisión como absurda, incluso insultante. Los diseños de las naves espaciales eran óptimos. El ímpetu de la comunidad era imposible de ignorar. Y ahora tenían al fosfano de su parte. De cualquier modo, si tanto VERITAS como DAVINCI+ hubieran sido rechazadas, aún habría habido razones para el optimismo. Además de las prometedoras perspectivas de EnVision, otras agencias espaciales, entre ellas las de Rusia y la India, han estado contemplando seriamente un regreso a Venus y podrían haber recogido el testigo si la NASA no hubiera dado el paso.

Los expertos en Venus más jóvenes, como O'Rourke, también estaban decididos a mantener viva la llama, incluso tras la jubilación de las venerables leyendas de la comunidad de expertos de Estados Unidos. «La última vez que una nave estadounidense entró en órbita en torno a Venus yo era un bebé de 10 días», destaca O'Rourke. Pese a la falta de oportunidades para llevar a cabo una misión, «me metí en esto, como mucha gente de mi generación, porque obviamente es muy interesante». Sospecha que el interés por la ciencia de Venus no se habría extinguido, con independencia de lo que hubiera ocurrido en la última convocatoria del programa Discovery.

En los días previos a la trascendental decisión de la NASA, las palabras de los expertos en Venus aún destilaban miedo. Sin embargo, gracias a los mundos que orbitan alrededor de otras estrellas, en ellas también se advertía una nota de esperanza. Los cazadores de exoplanetas han descubierto multitud de mundos del tamaño de la Tierra en otras estrellas. Sin embargo, con los telescopios actuales resulta casi imposible discernir si son acogedores como nuestro planeta o infernales como Venus. Por el momento, puede que estudiar Venus más de cerca sea la única vía para estimar de manera fiable cuál de esas dos opciones es más habitual en el cosmos. Quienes buscan exoplanetas están empezando a darse cuenta de ello y a valorar que tal vez deberían conocer un poco mejor nuestro propio sistema solar, añade Sousa-Silva, «aunque solo sea porque constituye un magnífico laboratorio para la investigación de exoplanetas».

Desentrañar el misterio de Venus no beneficiaría solo a unos pocos, sino a toda la comunidad de planetólogos. «Solo Venus puede decirnos por qué nuestro planeta es único en el sistema solar y qué probabilidades hay de encontrar una "Tierra 2.0" alrededor de otra estrella», afirma Smrekar. Mientras aguardaban el anuncio, los equipos de VERITAS y DAVINCI+ confiaban en que esa convicción, ampliamente compartida, haría que al menos una de las dos misiones cruzara al fin la línea de meta.

LA LLEGADA DE LA FLOTA

Después de que la NASA comunicara que Venus había salido victorioso en sus últimas selecciones del programa Discovery, los proponentes de VERITAS y DAVINCI+ disfrutaron del momento. «Hacía años que no daba tantos saltos de alegría», rememora Gilmore. «¡Vamos a Venus!», exclama Garvin con entusiasmo. «No sé qué más podríamos haber hecho para conseguir que esta fuera la misión idónea para el momento actual», señala Smrekar. «Creo que lo hemos logrado. Y creo que la NASA se ha dado cuenta.»

Magallanes fue la primera misión en la que trabajó Smrekar. Ahora sostiene que VERITAS será la última, y también la culminación de toda su vida científica. «Será el colofón a mi carrera», afirma. «Estoy deseando ver qué descubrimos.» Estos dos equipos no solo rompieron la maldición, sino que arrasaron con ella. Y tan solo una semana después, los responsables europeos eligieron la misión EnVision. En la década de 2030, Venus tendrá su propia flota de detectives científicos.

Para los derrotados, la inevitable decepción viene teñida de optimismo. Los partidarios de una misión a Ío esperan cantar victoria en la próxima convocatoria del programa Discovery, o incluso en el siguiente peldaño, el de las misiones más caras y avanzadas del programa New Frontiers de la NASA. Quienes pretenden volver a los tantas veces olvidados Urano y Neptuno, que no reciben una nave espacial desde finales de los ochenta, tienen en mente una futura misión del programa Flagship: uno de los colosos de más de 1000 millones de dólares que conforman la cúspide de la flota de exploración espacial de la NASA en cuanto a tamaño, coste y capacidad.

Los expertos en Venus, por su parte, se vieron en la tesitura de acostumbrarse a su nueva condición de triunfadores. Gracias a sus incansables esfuerzos, la próxima década pertenecerá al segundo planeta más próximo al Sol. Por fin, subraya Ghail, «se reconoce que tenemos que hacer en Venus lo mismo que hemos hecho en Marte».

Al igual que sus colegas de DAVINCI+ y EnVision, Smrekar y el equipo de VERITAS se muestran a la vez emocionados, exhaustos e incrédulos. La noche anterior al anuncio de la NASA, Smrekar había tomado una fotografía de Venus, apenas un punto brillante en el cielo oscuro. Tras el comunicado, y a la luz de un nuevo día, esa mota diamantina tenía un aspecto muy diferente. Ya no era una isla inalcanzable, sino el destino que marcará el próximo gran paso de la exploración interplanetaria. IyC

PARA SABER MÁS

DAVINCI: Deep atmosphere Venus investigation of noble gases, chemistry, and imaging. Lori S. Glaze et al. en *2017 IEEE Aerospace Conference*, págs. 1-5, junio de 2017.

Venusian habitable climate scenarios: Modeling Venus through time and applications to slowly rotating Venus-like exoplanets. M. J. Way y Anthony D. Del Genio en *JGR Planets*, vol. 125, art. e2019JE006276, mayo de 2020.

Phosphine gas in the cloud decks of Venus. Jane S. Greaves et al. en *Nature Astronomy*, vol. 5, págs. 655–664, septiembre de 2020.

Venus tesserae feature layered, folded, and eroded rocks. Paul K. Byrne et al. en *Geology*, vol. 49, págs. 81-85, enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático global en Venus. Mark A. Bullock y David H. Grinspoon en *IyC*, mayo de 1999.

El exoplaneta vecino. M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane en *IyC*, abril de 2019.

Tres misiones para desvelar los misterios de Venus. Jonathan O'Callaghan en *IyC*, agosto de 2021.



Christof Koch es director científico del programa MindScope en el Instituto Allen de Neurociencia y de la Fundación Tiny Blue Dot. Es autor de *The feeling of life itself: Why consciousness is widespread but can't be computed*. Forma parte del consejo de asesores de *Scientific American*.



NEUROCIENCIA

El cerebro eléctrico

La estimulación del tejido cerebral mediante electrodos revela la topografía de la experiencia consciente

Christof Koch

Ilustración de Zara Picken

Considere las siguientes experiencias:

— Se dirige usted hacia una tormenta situada a un par de kilómetros y debe atravesar una colina. Se pregunta: «¿Cómo voy a lograrlo, a pasar por ahí?».
— Usted ve unos puntitos blancos sobre un fondo negro, como si estuviera contemplando las estrellas.
— Desde lo alto, se observa a sí mismo tumbado en la cama, pero solo advierte sus piernas y la parte inferior del tronco.

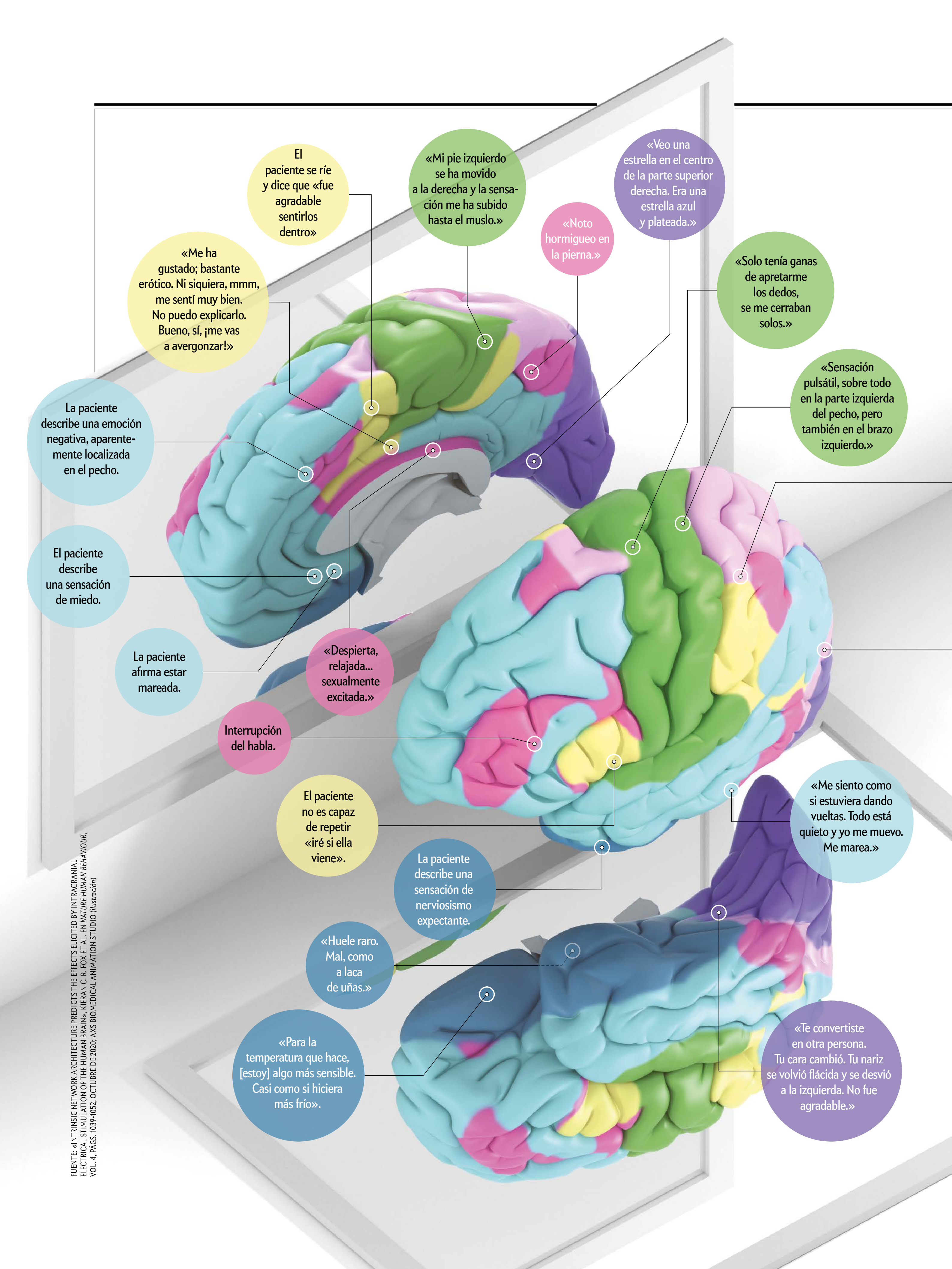
Podrían parecer sucesos idiosincrásicos extraídos del vasto universo de percepciones, sensaciones, recuerdos, pensamientos y sueños que conforman el flujo diario de nuestra consciencia. En realidad, cada una de esas experiencias se provocó mediante la estimulación directa del cerebro con un electrodo. Tal y como intuyó Walt Whitman en su poema «Yo canto al cuerpo eléctrico», tales anécdotas ilustran la íntima relación que existe

EN SÍNTESIS

La estimulación cerebral intracraneal mediante impulsos eléctricos es una herramienta útil en neurocirugía y para tratar ciertas dolencias.

También ha servido para identificar las áreas de la corteza cerebral implicadas en la percepción consciente, que no coinciden con las que procesan el pensamiento y otras funciones cognitivas superiores.

Esos hallazgos se están poniendo en práctica en «interfaces cerebro-máquina» que podrían ayudar a pacientes con deficiencias visuales a percibir la luz o a aquellos con discapacidades físicas a desarrollar acciones con la mente.



FUENTE: «INTRINSIC NETWORK ARCHITECTURE PREDICTS THE EFFECTS ELICITED BY INTRACRANIAL ELECTRICAL STIMULATION OF THE HUMAN BRAIN», KIERAN C. R. FOX ET AL. EN *NATURE HUMAN BEHAVIOUR*, VOL. 4, PÁGS. 1039-1052, OCTUBRE DE 2020; AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*)

PERCEPCIONES DE LA ESTIMULACIÓN CEREBRAL

¿En qué partes del cerebro residen las experiencias?

Un atlas publicado recientemente recoge los informes verbales de personas epilépticas cuyas áreas corticales se estimularon con electrodos durante una operación quirúrgica. Sus sentimientos y percepciones variaron en función de la región cerebral estimulada. Los 1537 puntos de estos 67 pacientes donde se aplicó la corriente se representaron en un modelo digital del cerebro (aquí se muestra una versión simplificada). Tras recibir la estimulación, los pacientes relataron sus experiencias.

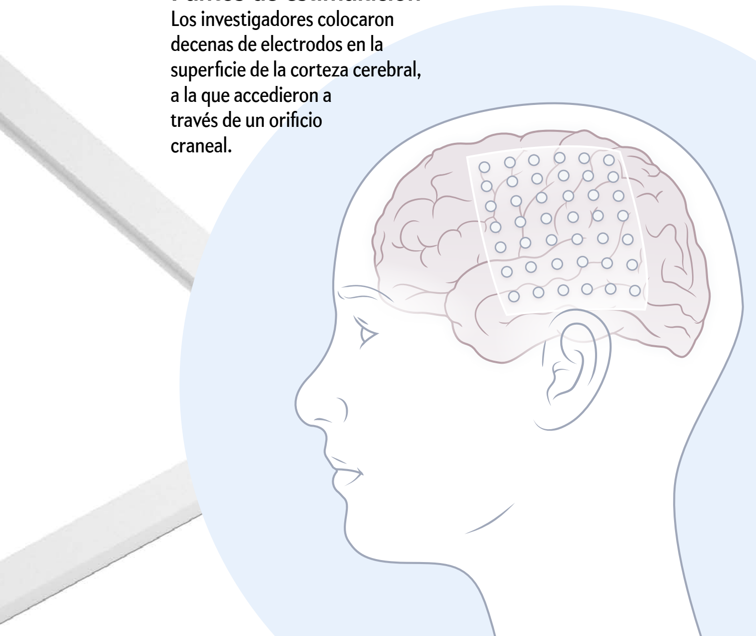
Colores de la cognición
Se estimularon distintas redes, regiones y sistemas del cerebro.

- Somatomotora
- Visual
- Atención dorsal
- Saliencia
- Frontoparietal
- Límbico
- Color por defecto

«Casi no podía moverlos (los dedos). Sentía la mano algo tensa, pero el pulgar estaba fuera de combate.»

«Sentía como si mis brazos se movieran, aunque no lo hacían. Notaba movimientos de un lado a otro, como si estuviera flotando.»

Puntos de estimulación
Los investigadores colocaron decenas de electrodos en la superficie de la corteza cerebral, a la que accedieron a través de un orificio craneal.



entre el cuerpo y el alma que lo anima. El cerebro y la mente consciente están ligados tan inexorablemente como las dos caras de una moneda.

Los ensayos clínicos recientes han desvelado algunas de las leyes y regularidades de la actividad consciente, en ocasiones paradójicas. Esos trabajos muestran que las áreas cerebrales implicadas en la percepción consciente apenas guardan relación con el pensamiento, la planificación y otras funciones cognitivas superiores. Los neuroingenieros tratan de convertir estos hallazgos en dispositivos que suplan la pérdida de funciones cognitivas o, en un futuro más lejano, que potencien nuestra capacidad sensorial, cognitiva o memorística. Así, una reciente interfaz cerebro-máquina confiere a las personas con ceguera total cierta capacidad de percibir la luz. Sin embargo, estas herramientas también revelan la dificultad de restablecer por completo la vista o el oído. Y subrayan los obstáculos que complican el desarrollo de artefactos futuristas para acceder al cerebro como si fuese un disco duro.

ELECTRICIDAD ANIMAL

Los sistemas nerviosos se basan en corrientes eléctricas que recorren redes ultradensas e hiperconectadas de elementos conmutadores. Multitud de médicos y científicos han analizado este problema en los últimos dos siglos y medio, empezando por el médico italiano Luigi Galvani, que a finales del siglo XVIII conectó una rana recién muerta a un largo cable metálico. Al dirigir el cable hacia el cielo durante una tormenta, logró que la pata del anfibio saltara y se contrajera con cada relámpago. Las investigaciones de Galvani revelaron que las fibras nerviosas transmitían «electricidad animal», idéntica a la «electricidad atmosférica» que descubrió Benjamin Franklin en 1752 en sus experimentos con cometas. En 1802, el sobrino de Galvani, Giovanni Aldini, estimuló electricamente el cerebro expuesto de un prisionero decapitado durante un acto público. Su mandíbula tembló y uno de sus ojos se abrió. Ese espectáculo pudo inspirar a Mary Shelley a escribir *Frankenstein*.

Los estudios posteriores en animales demostraron que excitar determinadas regiones cerebrales provocaba movimientos en músculos y miembros concretos. Esas investigaciones condujeron al descubrimiento de la corteza motora en la década de 1870. En 1874, el médico estadounidense Robert Bartholow llevó a cabo la primera estimulación directa del cerebro en una persona consciente. Este acto pionero se vio empañado por la controversia ética, puesto que causó dolor a la paciente y seguramente aceleró su muerte. La estimulación eléctrica intracraneal (EEI) se perfeccionó durante los siguientes decenios. Y pasó a formar parte de las herramientas de los neurocirujanos gracias al trabajo pionero de Wilder Penfield, del Instituto Neurológico de Montreal, quien entre las décadas de 1930 y 1950 usó la EEI para cartografiar las áreas corticales que procesan las funciones motoras o sensoriales.

En algunas personas epilépticas, los fármacos no controlan de forma adecuada el número o la gravedad de las crisis. La neurocirugía deviene una opción si las convulsiones se originan en una zona delimitada de la corteza (la capa más externa del cerebro, que se ocupa

de la percepción, el control motor, el habla o el razonamiento) o en estructuras estrechamente relacionadas, como el hipocampo. La hiperexcitabilidad descontrolada empieza debido a un error local en las conexiones, pero este puede extenderse y acabar afectando al resto del cerebro. El dilema es cuánto tejido extirpar: si se extrae poco, podrían continuar las crisis; si se extrae demasiado, el paciente podría dejar de hablar, ver o andar. Los cirujanos deben evitar las zonas de la corteza que son cruciales en nuestra vida cotidiana, como las cortezas primarias auditiva, visual, somatosensorial y motora o las regiones que controlan la comprensión y producción del habla. Todas esas áreas conforman lo que se conoce como «corteza elocuente».

La EEI ayuda a saber qué tejidos hay que preservar. Los neurocirujanos implantan electrodos con forma de disco en el interior del cráneo, bajo una membrana dura y coriácea llamada duramadre. Otra posibilidad es insertar electrodos con forma de aguja en la sustancia gris del cerebro para explorar su funcionamiento. Una vez que los cirujanos han identificado el foco de la convulsión y retirado los electrodos, extraen ese tejido en una operación posterior y el paciente suele dejar de sufrir crisis.

Los pacientes refirieron las experiencias que les provocaron los electrodos, como la visión de rostros distorsionados semejantes a los que pintaba Dalí

Otro uso de la EEI es la estimulación eléctrica crónica, donde los electrodos quedan implantados de forma permanente. Enviando pequeños pulsos de corriente a través de los electrodos es posible controlar los temblores y la rigidez de la enfermedad de Parkinson (una técnica denominada estimulación cerebral profunda) o reducir la incidencia y gravedad de las crisis convulsivas. Algunos ensayos clínicos preliminares evalúan si esos electrodos implantados podrían servir como prótesis visuales en personas con problemas de visión o para tratar el trastorno obsesivo-compulsivo y la depresión [*véase* «Neuromodulación contra la depresión resistente», por Cristina V. Torres Díaz, Juan A. Barcia Albacar, Juan J. López Ibor y Andrés M. Lozano; Mente y Cerebro, n.º 55, 2012].

MAPAS CEREBRALES

En 2020, *Nature Human Behaviour* publicó un atlas que detalla las localizaciones de la corteza que desencadenan experiencias conscientes (como las expuestas al comienzo de este artículo) al excitarlas con electrodos. Un equipo dirigido por Josef Parvizi, catedrático de neurología de la Universidad Stanford, recogió datos de 67 personas epilépticas. Los investigadores registraron la actividad eléctrica en más de 1500 lugares de la corteza, sobre todo con electrodos subdurales. Luego asociaron esos registros a puntos de un modelo digital del cerebro, para poder comparar los datos de distintos pacientes (ya que el patrón de crestas y surcos del cerebro varía de una persona a otra). El equipo buscó los electrodos «reactivos», es decir, aquellos que inducían sensaciones visuales o táctiles, contracciones musculares o interrupciones del habla.

Los pacientes refirieron una serie de experiencias subjetivas provocadas por los electrodos: destellos breves similares a estrellas; rostros distorsionados como los que pintaba Dalí; sensación de hormigueo, cosquilleo, ardor, palpitaciones y experiencias extracorpóreas; miedo, malestar, excitación sexual, júbilo; deseo de mover una extremidad; voluntad de perseverar ante un reto extraordinario y desconocido. Bastaba con «acariciar» el tejido neuronal con diminutas corrientes eléctricas para desencadenar esas sensaciones. Durante la estimulación simulada (sin aplicar ninguna corriente), los pacientes no sintieron nada.

La EEI es segura y eficaz, pero también tosca. Los electrodos de baja impedancia tienen una superficie de entre 6 y 10 milímetros cuadrados y suministran hasta 10 miliamperios de corriente eléctrica entre electrodos adyacentes, suficiente para modular la excitabilidad de un millón de neuronas o más. Sin embargo, los efectos inducidos por la EEI pueden estar bastante localizados. A veces la respuesta cambia de todo a nada en cuestión de milímetros o al cruzar un surco de la superficie cortical.

El equipo de Parvizi halló que los electrodos situados en las áreas sensoriales o motoras tenían muchas más probabilidades de ser reactivos que los de las áreas corticales que procesan las funciones cognitivas superiores. Entre la mitad y dos tercios de los electrodos situados sobre las áreas visuales y táctiles (corteza somatosensorial) desencadenaron alguna percepción consciente; en las regiones de la corteza prefrontal lateral y anteromedial, encargadas de los procesos cognitivos superiores, lo logró como mucho uno de cada cinco electrodos. En otras palabras, los electrodos situados en la parte posterior de la corteza (en áreas responsables de las experiencias sensoriales) se activaban con mayor facilidad que los de la parte delantera, que consta de regiones esenciales para actividades cognitivas como el pensamiento, la planificación, el razonamiento moral, la toma de decisiones y la inteligencia.

Pese a su importancia para el pensamiento, estas áreas guardan poca relación con la consciencia. De hecho, durante el último siglo, los neurocirujanos han observado que pueden extirpar regiones extensas de la corteza prefrontal sin causar problemas evidentes en el flujo diario de la consciencia, siempre que no se vea afectada la corteza elocuente. Esas regiones pueden modular la consciencia, pero no parecen ser el origen de la experiencia consciente. Tal privilegio corresponde a otras regiones más dorsales: los lóbulos parietal, temporal y occipital. Sigue siendo un misterio por qué el sustrato físico de nuestra experiencia mental se encuentra en la parte posterior del cerebro.

VER O NO VER

La aplicación de EEI a la corteza visual induce sensaciones ópticas denominadas fosfenos, breves destellos similares a rayos que caen en la oscuridad. Eso ha llevado a soñar con una prótesis que devuelva algo de visión a los pacientes ciegos. En el mundo hay millones de personas con deficiencias en ambos ojos por culpa de traumatismos, retinitis pigmentaria, degeneración macular asociada a la edad, glaucoma, infecciones o cáncer.

Médicos, científicos e ingenieros empezaron a interesarse por las prótesis visuales en la década de 1960, pero hasta los últimos tiempos no han logrado desarrollar dispositivos para ayudar a los invidentes. Un buen ejemplo de ellos es Orion, un sistema de la empresa californiana Second Sight. Se trata de una cámara diminuta montada en unas gafas, que transforma las imágenes en impulsos y los transmite por vía inalámbrica para activar 60 electrodos situados en la corteza visual. El puñado de personas a quienes se les ha implantado este dispositivo experimental en el cerebro perciben nubes de puntos que les permiten desplazarse. «Sigue siendo alucinante cada vez que lo enciendo», afirma un

participante del estudio. «De repente, paso de no ver nada a ver pequeños destellos luminosos a mi alrededor y a comprender que significan algo. Es increíble volver a tener cierta forma de visión funcional.» Orion mejora notablemente la calidad de vida de aquellos que vivían en la más absoluta oscuridad. Les permite cruzar la calle de forma segura o localizar un portal, pero no les ayuda a reconocer figuras, formas o letras.

Un equipo de la Universidad de California en Los Ángeles y de la Escuela de Medicina de Baylor dirigido por el neurocirujano Daniel Yoshor ha logrado recientemente esa hazaña, como describen en la revista *Cell*. Estimularon lugares próximos de la corteza visual para desencadenar fosfenos que aparecieran juntos, y comprobaron que existe una correspondencia regular entre el entorno visual externo y la superficie de la corteza visual. Esta observación ha llevado a la creencia errónea de que cada fosfeno es como un píxel de una pantalla; es decir, que si estimuláramos al mismo tiempo una serie de puntos de la superficie cortical con forma de cruz, el sujeto vería una cruz de puntos. Sin embargo, eso no es lo que sucede.

Estimular más de un lugar produce resultados imprevisibles. En un participante, la activación simultánea de cinco electrodos, cada uno asociado a un fosfeno distinto, provocó la iluminación de dos grandes fosfenos que no se fundieron en una letra u otra forma coherente. Pero al activar los electrodos de manera escalonada, el sujeto pudo identificar las formas. Este escalonamiento reflejaba el tiempo necesario para trazar la forma de la letra, como si el investigador la estuviera dibujando en la mano del paciente o en un papel. Gracias a este enfoque más dinámico, el sujeto con el implante y cuya visión se hallaba bloqueada logró identificar los estímulos, dibujando una Z, una N, una V y una W, y enseguida fue capaz de distinguir el movimiento ascendente del descendente, así como secuencias de letras.

Ver la forma de una letra no es lo mismo que contemplar una maravillosa puesta de sol en el mar color vino de Homero, pero supone un avance. No está claro por qué la estimulación escalonada mejora la percepción, y eso revela nuestra ignorancia en cuanto al funcionamiento de los circuitos corticales.

¿QUÉ NOS DEPARA EL FUTURO?

Las llamadas interfaces cerebro-máquina están experimentando grandes progresos. La empresa Neuralink, de Elon Musk, publicó en abril un impresionante vídeo donde se veía a un mono jugar al *Pong* (un videojuego basado en el tenis de mesa) sin mando alguno, gracias a dos pequeños chips implantados en las cortezas motoras izquierda y derecha del animal. Cada chip constaba de 1024 electrodos finísimos que registraban la actividad de neuronas individuales y transmitían la intención del mono de subir o bajar rápidamente la pala por la pantalla para devolver la pelota al otro lado. Todo era inalámbrico: de la cabeza del mono no salía ningún dispositivo electrónico o cable. Muchos se imaginan que los cirujanos pronto sustituirán de manera rutinaria elementos biológicos dañados (ojos, oídos o incluso memorias) por dispositivos electrónicos que los superen en prestaciones. Pero ese optimismo no tiene en cuenta la necesaria trepanación craneal. En general, convertir el conocimiento científico en tratamientos reales requiere décadas, no años. A mis 64 primaveras, estoy convencido de que no llegaré a ver tales ingenios.

Los obstáculos más «fáciles» de superar en el camino hacia ese futuro utópico (o quizás distópico) son los técnicos: leer el cerebro y escribir en él de un modo fiable, rápido y delicado. El dispositivo de Neuralink representa la vanguardia de la tecnología actual y sin duda mejorará en futuras iteraciones. Pero todavía nos falta mucho para identificar qué neuronas de las 50.000 o más que componen un fragmento cerebral del tamaño de una semilla de quinua intervienen en una cierta percepción o acción. Y hasta que no lo logremos, no podremos limitar la estimulación eléctrica a esas neuronas, evitando los cables de salida de las células vecinas. Recordemos que Parvizi y sus colaboradores no lograron inducir percepciones conscientes en más de la mitad de los puntos estimulados. Eso muestra que no disponemos de herramientas fiables para provocar una sensación cualquiera por medio de la estimulación eléctrica, y mucho menos una sensación concreta.

Aún más complejos se antojan los obstáculos quirúrgicos y legales. Es preciso implantar las prótesis de manera sistemática y segura en la sustancia gris tras perforar el duro hueso craneal, minimizando el riesgo de infecciones, hemorragias y convulsiones. Además, la electrónica debe funcionar durante años en el seno de un tejido biológico caliente, húmedo y salado, unas condiciones nada óptimas. No queremos que las prótesis se corroan o se queden bloqueadas en el equivalente a la «pantalla azul de la muerte». Por eso, los implantes neuronales seguirán siendo el último recurso para las personas con deficiencias sensoriales o motoras graves. A medida que las neuroprótesis vayan superando los ensayos clínicos, ayudarán a las personas con deficiencias visuales a ver y a aquellas con discapacidades físicas a realizar acciones como gobernar una silla de ruedas con la mente, igual que el mono que jugaba al *Pong*. Para todos los demás, no parece probable que los beneficios de una cirugía cerebral altamente invasiva vayan a compensar los costes.

El verdadero reto al que nos enfrentamos es averiguar cómo kilo y medio de materia cerebral excitable nos permite ver, movernos y sufrir. Sí, el sustrato físico del cielo y el infierno se basa en señales bioeléctricas que obedecen las leyes naturales. Pero eso nos dice muy poco sobre el modo en que ese billón de señales eléctricas emitidas por segundo generan una imagen, un sonido o una emoción tras atravesar redes de decenas de miles de millones de células heterogéneas,

La estimulación cerebral intracraneal pone de relieve el milagro cotidiano de la conversión del agua cerebral en el vino de la consciencia. Pero la pregunta última sigue sin respuesta: ¿cómo logra el cerebro, la pieza de materia activa más compleja del universo conocido, transformar la actividad de 86.000 millones de neuronas en el sentimiento de estar vivo?

PARA SABER MÁS

Deep brain stimulation: current challenges and future directions. Andres M. Lozano et al. en *Nature Reviews Neurology*, vol. 15, págs. 148-160, marzo de 2019.
An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. Elon Musk y Neuralink en *Journal of Medical Internet Research*, vol. 21, art. e16194, octubre de 2019.
Dynamic stimulation of visual cortex produces form vision in sighted and blind humans. Michael S. Beauchamp et al. en *Cell*, vol. 181, págs. 774-783.e5, mayo de 2020.
Intrinsic network architecture predicts the effects elicited by intracranial electrical stimulation of the human brain. Kieran C. R. Fox et al. en *Nature Human Behaviour*, vol. 4, págs. 1039-1052, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Marcapasos para el cerebro. Morten L. Kringelbach y Tipu Z. Aziz en *MyC*, n.º 42, 2010.
La máquina que lee las intenciones. Richard Andersen en *IyC*, junio de 2019.
Penfield, el cartógrafo del cerebro. Laura Poupon-Béjuit en *MyC*, n.º 105, 2020.



SALVAR A LOS PUMAS de las montañas de Santa Mónica exige conectarlos de nuevo con las poblaciones más numerosas del norte de los Ángeles, como el grupo de la sierra de Santa Susana al que pertenece este ejemplar.

CONSERVACIÓN

UN PLAN PARA SALVAR A LOS PUMAS

La endogamia de los pumas en algunas regiones es tal que están empezando a mostrar anomalías genéticas. En California, un ambicioso plan para construir el mayor puente del mundo para la fauna silvestre podría salvarlos

Craig Pittman

Craig Pittman es periodista y escribe sobre medioambiente. Es autor del libro *Cat tale: The wild, weird battle to save the Florida panther* (Hanover Square Press, 2020).





l biólogo Jeff Sikich ha trabajado en el Área Recreativa Nacional de la Sierra de Santa Mónica, en California, desde 2002. Se ha enfrentado a un sinfín de sucesos extraños, como una vez, difícil de olvidar, en la que acudió a una llamada para disparar sus dardos tranquilizantes contra lo que resultó ser una estatua de un metro de altura de un puma y no un felino de verdad. Pero lo que halló un día de marzo de 2020 fue poco habitual y nada alentador, aunque no le sorprendió. «Siempre he sabido» que podía pasar, afirma, aunque deseaba que no fuera así.

Sikich había colocado en una jaula el cadáver de un ciervo atropellado con la esperanza de capturar un puma macho joven. Tras lograrlo, durmió al animal con un dardo tranquilizante. Al examinar más de cerca el ejemplar, «me fijé que su cola tenía algo distinto», recuerda Sikich. Se dio cuenta de que su extremo estaba torcido formando un ángulo de 90 grados, tan preciso como el de un ejercicio de geometría. Además, el felino solo poseía un testículo, pues el segundo no había descendido. Sikich le colocó un radiocollar al puma y lo bautizó como P-81, pues era el 81.º puma capturado y marcado en la región.

Pero P-81 no sería el último ejemplar en mostrar estas anomalías genéticas. Tras su captura, durante el visionado habitual del metraje de varias cámaras de fototrampeo, Sikich identificó a dos individuos más con la cola torcida. No consiguió ver sus testículos, pero el giro de la cola era evidente. Es un mal presagio para esta pequeña colonia de superdepredadores que pertenecen a una subespecie de *Puma concolor*, conocidos popularmente como puma, león de montaña o león americano.

Han transcurrido más de treinta años desde que los científicos hallaran por última vez ese tipo de anomalías genéticas en los pumas. En aquel entonces se identificaron en la otra punta del país y en una subespecie distinta, la pantera de Florida (*Puma concolor couguar*). A pesar del salto temporal y espacial, los pumas están reproduciendo dos de las mismas anomalías que manifestaron sus parientes y que se predijo los condenarían a la extinción. «Sin duda es una mala señal», advierte Stephen J. O'Brien, epidemiólogo genético de la Universidad Nova Southeastern, que colaboró con las autoridades de Florida para salvar a los pumas. «Es una llamada de advertencia.» Rescatar a la pantera de Florida exigió una increíble actuación humana, un ingente esfuerzo que también precisarán los felinos de Santa Mónica, aunque de otro tipo. Por fortuna, cuentan con la ayuda de un puma que merodea alrededor del icónico letrero que domina las colinas de Hollywood.

En el siglo xviii, los pumas todavía vagaban a sus anchas por toda Norteamérica y Sudamérica. Hoy en día, su distribución es dispersa, si bien aún abarca de Canadá a Argentina. Allá donde se halla, *P. concolor* no agrupa al mismo tipo de felino —presenta unas pocas diferencias genéticas—, pero todos los miembros de la especie son cazadores silenciosos, depredadores raudos y luchadores tenaces dotados de un cuerpo alargado y esbelto adaptado a la velocidad. Los machos miden entre unos 2 y 2,5 metros desde el hocico hasta la punta de su larga y pesada cola,

PÁGINAS ANTERIORES Y PÁGINA SIGUIENTE: SERVICIO DE PARQUES NACIONALES

EN SÍNTESIS

Solo hace tres siglos los pumas vagaban a sus anchas por toda América. Hoy sus poblaciones son mucho más reducidas y dispersas a causa de la acción humana y de construcciones que las aíslan, como las autopistas.

La fragmentación del hábitat y las barreras físicas han propiciado la endogamia y la aparición de anomalías genéticas, como las que amenazan a las poblaciones de las montañas cercanas a Los Ángeles, en California.

Una iniciativa para salvar a los pumas consiste en construir un paso elevado sobre una autopista o carretera que les permita acceder a parejas reproductoras de poblaciones más numerosas. El que se pretende construir en Los Ángeles sería el mayor del mundo.

mientras que las hembras miden entre unos 1,5 y 2 metros. En un esprint, pueden alcanzar los 80 kilómetros por hora. Los pumas son animales solitarios. Cazan solos, duermen todo el día y emergen al salir la noche en busca de sus presas. En libertad, pueden vivir unos doce años, siempre y cuando no mueran atropellados o a causa de otro puma.

Al nacer, los pumas son pequeñas bolas de pelo adorables, suaves y moteadas. Los adultos, en cambio, tienen el aspecto de un auténtico depredador. Su cuerpo está adaptado para la caza gracias a un esqueleto ligero, pero resistente, en el que se insertan potentes músculos. Poseen patas traseras más largas que la mayoría de los grandes felinos, con las que pueden dar saltos de hasta unos 4,5 metros de alto y de hasta unos 14 metros de ancho. Esta extraordinaria capacidad para saltar les permite sorprender a sus presas desde arriba, como si surgieran de la nada. Su pesada cola les ayuda a mantener el equilibrio durante estos impresionantes saltos. Si la presa intenta huir, sus enormes garras, de casi 13 centímetros de ancho, les ofrecen un buen agarre en los giros, una ventaja indudable durante una persecución. Cuando el puma está listo para dar la estocada final, extraen sus zarpas retraídas para aferrarse a cualquier presa y desmenuzarla con sus poderosas mandíbulas, provistas de 16 dientes superiores y 14 inferiores.

Los pumas desempeñan un papel crucial en la salud de los ecosistemas que habitan. Mantienen bajo control las poblaciones de sus presas. Además, dado que no suelen engullir su captura de una vez, sino que la devoran hasta saciarse y esconden las sobras para luego, los restos se convierten en un buffet libre para más de 200 especies de aves y mamíferos. A continuación, entran en escena los insectos, algunos de los cuales se pasan toda la vida en los despojos de esos animales muertos. Los insectos descomponen lo que queda del botín, lo que libera nutrientes al suelo.





P-81, UN PUMA DE SANTA MÓNICA, muestra anomalías genéticas derivadas de la endogamia, como una cola torcida.

Con todo, para que esta elaborada cadena funcione, los pumas precisan de mucho espacio para deambular. Los machos requieren un territorio de unos 400 kilómetros cuadrados, y las hembras, de unos 170. Es justo esa necesidad la que ha metido en líos a los pumas de las montañas de Santa Mónica.

Dado que limita con la gran ciudad de Los Ángeles, el Área Recreativa Nacional de la Sierra de Santa Mónica, con sus 62.000 hectáreas, es considerada el parque nacional urbano de mayor tamaño de los EE.UU. Sus valles han sucumbido bajo el hormigón para construir algunas de las autopistas más transitadas del país, que conectan un batiburrillo aún en crecimiento de edificios residenciales y comerciales. Cada nueva urbanización o centro comercial araña unas cuatro hectáreas de terreno por aquí, o seis hectáreas por allá, lo que fragmenta el paisaje y la población de pumas. En el peor de los casos, esta fragmentación aísla a los machos de otras hembras reproductoras. Como consecuencia de ello, el número de posibles parejas se vuelve peligrosamente escaso, algo parecido a lo que ocurrió con la pantera de Florida.

La mayoría de las panteras de Florida viven en territorios bajos y pantanosos contiguos a los Everglades, una región conocida como Reserva Nacional del Gran Ciprés. Son el último reducto de los pumas que los exploradores españoles y los primeros colonos llamaron «leones». En el pasado, vagaron por todo el sudeste del país, pero en la década de los 80 del siglo xx eran los únicos pumas al este del Misisipi. Con la pérdida de su hábitat y la desaparición de sus presas favoritas, su número menguó hasta contar con no más de 30 ejemplares. Algunos cálculos incluso arrojan valores de un solo dígito. Ante una población tan exigua, la endogamia se volvió inevitable y padres, hermanos y madres se aparearon con hijas, hermanos e hijos. De estos cruces no tardaron en nacer crías con colas torcidas y testículos no descendidos. Algunas incluso presentaban una comunicación interauricular, es decir, un orificio en el corazón. Es como si se hubieran topado con un callejón sin salida biológico.

La diversidad genética es clave para la supervivencia de una especie y su adaptación a condiciones cambiantes. Sin ella, una enfermedad infecciosa puede borrar de un plumazo a todo un grupo. Las anomalías genéticas de los pumas eran las señales visibles de un deterioro invisible. Los machos mostraban un 94 por ciento de espermatozoides con anomalías morfológicas frente a un 6 por ciento de espermatozoides normales, indica O'Brien. Algunos expertos propusieron un programa de cría en cautividad para fortalecer la población de pumas. La idea consistía en capturar crías salvajes, que se mantendrían en unas instalaciones especiales, para luego aparearlas de forma selectiva a fin de obtener una población base genéticamente diversa que pudiera reintroducirse en la naturaleza. El plan nunca

pudo iniciarse, pues resultó que todas las crías que debían cruzarse manifestaban las anomalías.

Al final, las autoridades estatales convencieron al Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de dar luz verde a un experimento sin precedentes. En 1995, encargaron a un experto rastreador llamado Roy McBride que capturara ocho hembras de puma en Texas para trasladarlas a Florida y liberarlas en la naturaleza a fin de que se aparearan con los machos de la zona. Creían que el proyecto podía funcionar, pues lo más probable era que las dos subespecies se hubieran cruzado en el pasado cuando sus territorios se solapaban. En efecto, cinco de las ocho hembras dieron a luz camadas híbridas que carecían de las anomalías. La descendencia sana desencadenó un *baby boom* entre los felinos. Hoy en día, entre unos 130 y 200 pumas adultos deambulan por lo que queda de la Florida salvaje.

Uno de los motivos por los que ningún experimento como este se había acometido antes era el temor a que acabara con la protección legal contemplada en la Ley de Especies en Peligro. Los detractores advertían de que las camadas nacidas del cruce entre panteras de Florida y pumas de Texas podían dejar de ser consideradas panteras de Florida y, por lo tanto, perder su condición de especie protegida. El Servicio de Pesca y Vida Silvestre aprobó una ley provisional para que el experimento pudiera llevarse a cabo. El otro recelo provenía del hecho de que los genes distintivos del puma pudieran introducirse en el material genético de la subespecie de Florida. Aunque ambas pertenecen a la misma especie, los científicos sostienen que poseen marcadores genéticos que demuestran que se trata de subespecies distintas.

Sin embargo, dos estudios posteriores concluyeron que tal contaminación genética no se produjo. Uno de ellos analizó muestras genéticas de casi 600 panteras de Florida, obtenidas desde 1981, y rastrearon la genealogía de todos los felinos aún con vida comparándola con la de los felinos nacidos después de la llegada de los pumas de Texas. El estudio halló que la población de panteras de Florida se triplicó, la diversidad genética se duplicó y los parámetros de supervivencia y aptitud biológica mejoraron, y, además, los indicadores de endogamia disminuyeron. En el futuro, se deberán introducir en el territorio de las panteras de Florida cinco pumas de Texas cada 20 años para evitar la endogamia y reducir el riesgo de extinción, siempre y cuando el rápido desarrollo urbanístico impulsado por el ser humano les siga dejando espacio.

A pesar del gran éxito del programa de «rescate genético» de las panteras de Florida, los pumas californianos precisan de una actuación totalmente diferente, ya que están mucho más restringidos por la fragmentación de su hábitat. La solución a sus anomalías genéticas, aseguran los expertos, se esconde mucho más cerca de su hogar. Y precisa de más hormigón, no de menos.

HÁBITAT FRAGMENTADO

El asedio a los pumas

Los pumas de California están muy restringidos por la fragmentación de su hábitat, propiciada por el desarrollo urbanístico de la zona. Esta fragmentación ha aislado a los machos de las hembras reproductoras, lo que ha acarreado una endogamia que ha mermado la diversidad genética de algunas poblaciones, como las de la sierra de Santa Mónica y Santa Ana, hasta niveles peligrosamente bajos.

Poblaciones de puma en California

El estado cuenta con nueve grupos de pumas diferenciados desde el punto de vista genético. Los seis que agrupa la línea discontinua, incluidos los de Santa Mónica, conforman lo que se conoce como «subunidad evolutivamente relevante», que podría clasificarse como amenazada conforme a la Ley de especies en peligro de extinción de California.

Zona ampliada

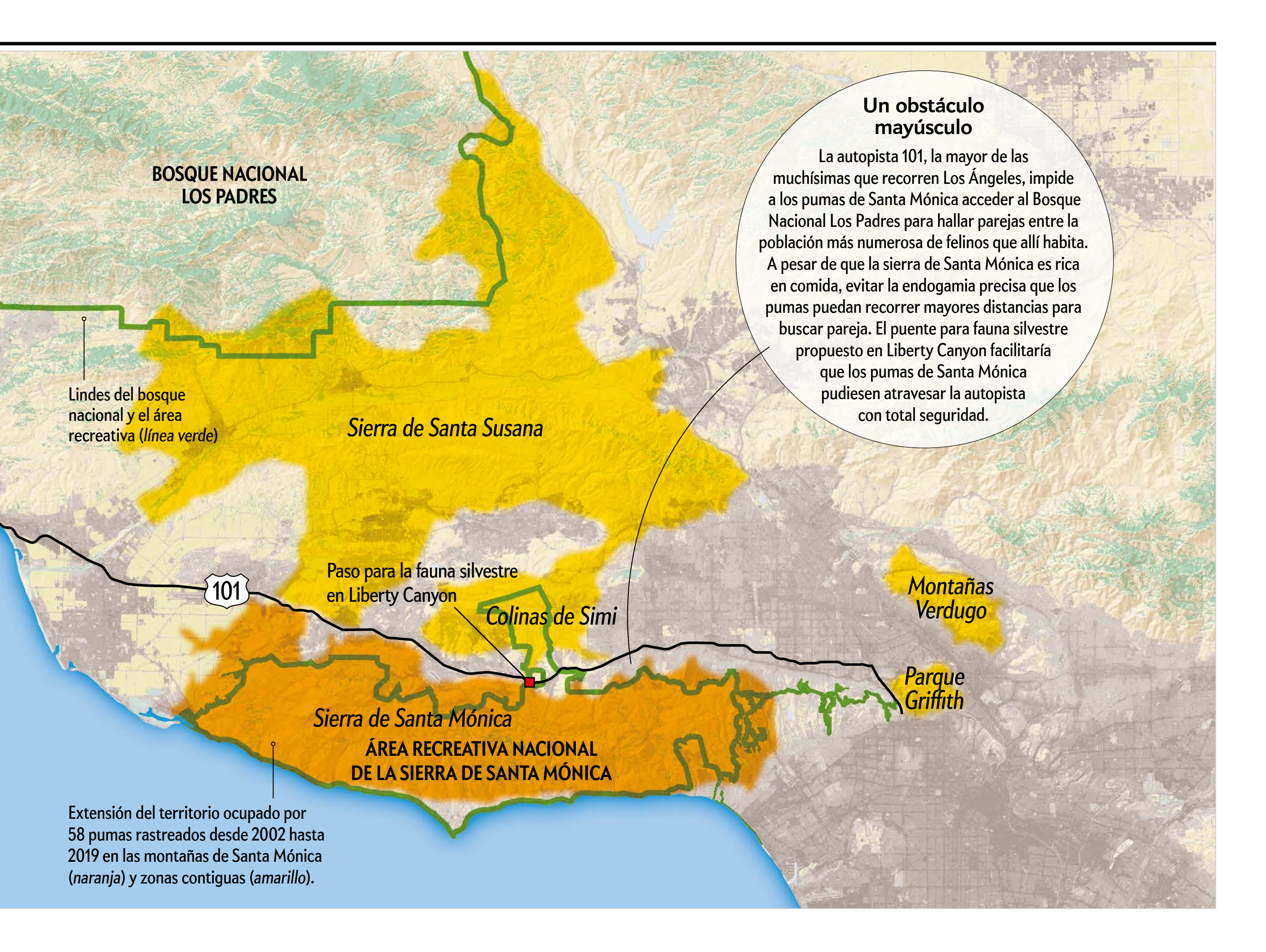
Cadena montañosa de Sierra Madre

Sierra de Santa Ana

FUENTE: «GENETIC SOURCE–SINK DYNAMICS AMONG NATURALLY STRUCTURED AND ANTHROPOGENICALLY FRAGMENTED PUMA POPULATIONS», POR KYLE D. GUSTAFSON ET AL., EN *CONSERVATION GENETICS*, VOL. 20, DICIEMBRE DE 2018 (*referencia del mapa de California*).

John Benson tenía en mente lo ocurrido con las panteras de Florida mientras redactaba un estudio sobre el futuro de dos poblaciones de pumas de la sierra de Santa Mónica que, debido a la acción humana, habían sido separadas de un grupo de mayor tamaño de zonas naturales cercanas. En concreto, el estudio intentaba prever su riesgo de extinción en 50 años. Benson, en aquel entonces ecólogo del Centro La Kretz de Ciencias de la Conservación, de la Universidad de California en Los Ángeles, había trabajado antes con las panteras de Florida cuando colaboraba con la Comisión de Conservación de Vida Silvestre y Pesca de Florida, por lo que conocía su historia. Para él, lo ocurrido con esta subespecie era una señal de advertencia para los pumas. Los científicos dedicados a esta especie son conscientes de que tratan con una megafauna carismática que las personas suelen percibir como grandes gatos domésticos. De hecho, investigan a superdepredadores de gran tamaño, cada uno con su propia personalidad y necesidades específicas. Los pumas tienden a ser escurridizos y rehúyen al ser humano, lo que dificulta aún más los esfuerzos para comprenderlos. Por sus dimensiones, en ocasiones despiertan miedo en la gente, lo que añade presión política a los biólogos, quienes deben minimizar los riesgos de un posible conflicto derivado de los esfuerzos de conservación para incrementar la población.

Cuando Benson, Sikich, Seth Riley (compañero de Sikich en el Servicio de Parques Nacionales) y sus colaboradores publica-



FUENTE: «SURVIVAL AND COMPETING MORTALITY RISKS OF MOUNTAIN LIONS IN A MAJOR METROPOLITAN ÁREA», POR JOHN F. BENSON, JEFF A. SIKICH Y SETH P. D. RILEY EN *BIOLOGICAL CONSERVATION*, VOL. 241, ENERO DE 2020 (*referencia de la distribución del puma*); MAPPING SPECIALISTS (*mapas*)

ron el artículo, describieron un par de posibles escenarios. De acuerdo con el modelo informático, «se reproducían bastante bien, por lo que la población se mantendría estable», explica Benson. El estudio halló una probabilidad de extinción de solo entre el 16 y 21 por ciento, mitigada por la presencia de su hábitat de matorrales y la disponibilidad de presas. «A pesar del desarrollo urbanístico y las carreteras que se extienden a su alrededor, el 90 por ciento de las montañas de Santa Mónica sigue siendo natural, o relativamente natural, y la mitad es de propiedad pública», aclara Riley.

El problema, advierte el experto, reside en que «la sierra de Santa Mónica es, por sí sola, demasiado pequeña para acoger a una población viable desde el punto de vista genético o demográfico, y no está lo suficientemente conectada con otras áreas naturales cercanas». Cuando los autores incluyeron en el modelo la ausencia de diversidad genética en los pumas, el resultado varió de forma drástica debido a lo que los científicos denominan «depresión endogámica». La población de la sierra de Santa Mónica y la de la sierra de Santa Ana, en el condado de Orange, ya encerraban la diversidad genética más baja registrada en el puma —a excepción de las panteras de Florida en 1995—. Tras incorporar la ausencia de diversidad genética, prosigue Benson, cada análisis del modelo coincidía en que, una vez iniciada la depresión endogámica, esos pumas se extinguirían probablemente en 50 años.

Cuando se publicó el artículo, Benson y los coautores no sospechaban que las primeras señales de anomalías genéticas aparecerían tan pronto. Pero sabían que, con el tiempo, era probable que ocurriera, ya que el mayor obstáculo para el aumento de la diversidad genética de los pumas había estado bloqueando su paso desde 1950.

Los Ángeles es una ciudad de autopistas, y la 101, la mayor de todas, es una importante ruta norte-sur que une Los Ángeles con San Francisco y el Pacífico Noroeste. Posee de ocho a diez carriles por los que circulan unos 300.000 vehículos al día. Esta autopista impide el paso de los pumas de las montañas de Santa Mónica para aparearse con la población de felinos más numerosa del Bosque Nacional Los Padres, de casi 7700 kilómetros cuadrados. Según Riley, cuando los biólogos empezaron a colocar radiocollares a la docena de pumas que rastreaban en la sierra de Santa Mónica, constataron que los machos se acercaban a la 101 y que, tras toparse con la riada de tráfico, daban vuelta atrás. «El hábitat de la zona parece bueno» para los pumas de la sierra de Santa Mónica, asevera Riley. «Hay gran cantidad de ciervos.» Sin embargo, a causa de la carretera, solo pueden aparearse con animales emparentados estrechamente con ellos, lo que acentúa la endogamia.

Entonces, en 2009, se produjo un milagro. El 12.º puma capturado y marcado, P-12, halló la forma de atravesar la autopista en una zona conocida como Liberty Canyon, rodeada a ambos



EL PUENTE PARA FAUNA SILVESTRE que se pretende construir por encima de la autopista 101, mostrado según la interpretación de un artista, sería el mayor del mundo.

LIVING HABITATS LLC Y FEDERACIÓN NACIONAL DE VIDA SILVESTRE

lados de la calzada por hábitat natural. «Fue una gran hazaña», rememora Riley, «porque no solo fue capaz de cruzar y sobrevivir, sino también de reproducirse».

Un puñado de pumas ha seguido desde entonces la estela de P-12, la mayoría de noche cuando el tráfico es menos intenso. Un felino incluso averiguó cómo hacerlo recorriendo un conducto de unos dos metros de ancho situado bajo la autopista, que atravesó 42 veces en menos de un año, narra Riley. Pero luego ese puma murió debido a las quemaduras que le provocó un incendio forestal, y ningún otro ejemplar se ha aventurado desde entonces por ese oscuro y largo conducto.

A juicio de los biólogos de California, pretender ayudar a los pumas de Santa Mónica trasladándolos a una zona con una población más diversa de felinos, o desplazar a individuos de un grupo con una mayor diversidad a fin de que se apareen con los pumas de Santa Mónica, como hicieron las autoridades en Florida, parece ser una intromisión humana desproporcionada que acarrea un riesgo demasiado elevado de lesiones para los pumas salvajes. Aun así, de la observación de los cruces repetidos de la autopista 101 nació una idea: construirles un paso seguro para atravesarla. De esa manera, volverían a estar conectados con la población más numerosa de felinos que habita la cadena montañosa de Sierra Madre al norte, lo que les permitiría hallar parejas capaces de mejorar la mermada diversidad genética del grupo.

El Servicio de Pesca y Vida Silvestre y los responsables de transporte sopesaron la idea de un túnel, pero la descartaron. Acarrearía un coste desmesurado y alteraría en exceso la circulación por la autopista, sin ni siquiera ofrecer garantías de que los felinos fueran a utilizarlo. Eso dejaba solo una opción: construir un puente por encima de la autopista que facilitara la libertad de paso a los felinos de uno y otro lado. Las vallas situadas en cada extremo ayudarían a guiar a los animales al puente para evitar que se desviaran hacia el tráfico. Así, ya no sería necesario capturar a los pumas para trasladarlos. «Si les construimos este cruce elevado con vegetación, lo harán por sí mismos», sostiene Sikich.

Los responsables del Servicio de Parques Nacionales, tras consultarlo con los expertos en pasos para fauna silvestre y el Departamento Californiano de Transporte, conocido como Caltrans, trazaron un plan para levantar un puente de 50 metros de ancho construido unos cinco metros por encima de la calzada de la autopista 101. La punta norte conecta con una ladera y, al acercarse hacia el extremo sur, el paso desciende un poco, explica Sikich. En caso de erigirse, sería el puente para fauna silvestre más largo del mundo, y su coste se calcula en 87 millones de dólares. Se construiría y acondicionaría paisajísticamente para reproducir la vegetación circundante, además de dotarlo de barreras acústicas para amortiguar el bullicioso tráfico de abajo.

La mejor ubicación para el puente, concluyeron los biólogos, sería el lugar donde P-12 cruzó la autopista por primera vez en Liberty Canyon, una zona rodeada de malezas naturales en los dos flancos de la carretera. Los animales podrían cruzarlo a cualquier hora del día o de la noche sin temor a ser atropellados. El terreno a ambos lados de este tramo de autopista ya

está protegido. Aún mejor, linda con extensas franjas de hábitat protegido al norte y al sur del puente, lo que lo convierte en una solución viable para conectar las montañas de Santa Mónica. Los pumas no se darían ni siquiera cuenta de que deambulan por una estructura con sello humano.

Los conservacionistas abogaron por este tipo de puente por primera vez en Francia en la década de los 50 del siglo pasado y su popularidad ha ido en auge en Europa. Su fama empieza a abrirse camino también en los EE.UU. Por ejemplo, en 2018, Utah inauguró un puente elevado de unos 100 metros de largo y 15 de ancho para permitir el paso a alces, uapitís, ciervos y otros animales silvestres por encima de la interestatal 80, una vía de seis carriles cerca de Salt Lake City. El cruce en Liberty Canyon plantea un solo problema: Caltrans no cuenta con una provisión de dinero para edificar una autopista en los cielos cuyos principales usuarios sean depredadores felinos. Es en este punto donde un puma publicitario de cartón hace su aparición estelar.

Beth Pratt, de la Federación Nacional de Vida Silvestre, había trabajado en Yosemite y Yellowstone, por lo que estaba acostumbrada a parajes solitarios indómitos poblados por fauna silvestre. Descubrir que las montañas que se alzan alrededor de la gran ciudad de Los Ángeles eran el hogar de pumas fue como una «sacudida», recuerda. «Cambió la forma en que percibo la fauna silvestre.» Tras ser nombrada directora ejecutiva regional del centro californiano de la institución, Pratt contactó con los biólogos del Área Recreativa Nacional de la sierra de Santa Mónica para preguntarles si la organización podía hacer algo para ayudarles. «Me contestaron: “Bueno, está este pequeño paso que estamos intentando construir”.»

Se reunió con responsables de Caltrans para debatirlo. «El apoyo de Caltrans ha sido inestimable», relata. «Me dijeron: “No disponemos del dinero, pero si lo obtienes, lo construimos”.» Llegaron a un acuerdo en el que el 80 por ciento de la inversión —más de 69 millones de dólares— procedería de donaciones privadas, y el otro 20 por ciento, de fondos públicos para proyectos de conservación. No necesitan recaudar todo el dinero antes de iniciar las obras.

La Federación Nacional de Vida Silvestre lanzó la campaña de recaudación de fondos *Save LA cougars* («Salvad a los pumas de Los Ángeles») para recabar ese 80 por ciento y seleccionó una mascota que, de buen seguro, despertaría la simpatía del público: P-22, un puma macho que en 2012, contra todo pronóstico, instaló su residencia en el parque Griffith, cerca del famoso letrero de Hollywood. Los análisis genéticos demostraron que el animal pertenece a la población de las montañas de Santa Mónica, lo que implica que, para llegar a su nuevo hogar, tuvo que cruzar dos autopistas: la 101 y la interestatal I-405, otra de las principales carreteras de la zona. A pesar del entorno urbanizado, la comida y los escondites para refugiarse durante el día abundan en el parque Griffith. Pero P-22 es el único puma que merodea por este parque urbano de unos 15 kilómetros cuadrados, lo que le convierte en el ejemplar perfecto para la campaña. «Se trata de un animal solitario condenado al celibato», explica Pratt. «El público lo ha acogido con los brazos abiertos, es el relato de la víctima perfecta.»

Pratt encargó una imagen en cartón de P-22 a tamaño real que lleva consigo a actos de recaudación de fondos por todo los Ángeles y otros lugares. Ha logrado convencer a figuras bien conocidas, como el actor Sean Penn o el congresista Adam Schiff de California, para que posen con el puma inanimado, lo que ha atraído aún más atención sobre el asedio que se cierne sobre los pumas. El mensaje del proyecto se ha hecho viral, certifica: «Hemos recibido aportaciones de Londres o Florida. Una pareja de Kansas, que nunca ha puesto los pies en California, nos ha donado 500.000 dólares». En Los Ángeles se celebra incluso cada mes de octubre el día de P-22, en el que se organizan diversos actos festivos para recaudar dinero y concienciar sobre la situación de los pumas. El pasado otoño el formato del festival se volvió virtual, como muchos otros actos forzados a ello, lo que exigió un enfoque mucho más creativo, asegura Pratt. «Encargamos a varios programadores el diseño de una interfaz de juegos.» Uno de ellos muestra a P-22 intentando escapar del parque con una mochila propulsora.

Algunas voces han puesto en duda la utilidad del puente, aunque son la excepción. Durante la evaluación ambiental del proyecto, «se recibieron más de 8000 comentarios y solo 15 fueron contrarios a él», recuerda Pratt. Gentes de todo el espectro político se han solidarizado con la causa por el amor a los animales, y «este es un problema tangible que tiene solución», defiende.

En mayo, la colecta de fondos alcanzó la cifra de 44 millones de dólares, más que suficiente para que el proyecto avance hacia su diseño final y la fase de ingeniería. En julio, el gobernador Gavin Newsom aprobó un presupuesto estatal que contempla destinar 7 millones de dólares al puente para fauna silvestre de Liberty Canyon. Caltrans prevé iniciar la construcción en fecha tan cercana como este noviembre. El objetivo es inaugurar el puente para que los pumas puedan estrenarlo en 2024.

Pratt indica que no disponen de un plan B para los felinos y que no cree que vayan a necesitarlo. No lograr el objetivo de recaudación marcado «solo retrasaría la obra, no la cancelaría, aunque ni tan siquiera prevemos retrasos en estos momentos», añade.

Pero ahora que P-81 y otros dos pumas de cola torcida se han dejado ver, la colecta de fondos se ha convertido en una carrera contrarreloj para rescatar a los pumas de Santa Mónica antes de que sea demasiado tarde. «Es probable que su diversidad genética siga deteriorándose», advierte Benson. «Pero lo que nadie puede afirmar es en qué momento los condenará a su extinción. No queremos aguardar hasta que no haya vuelta atrás.» Por otro lado, razona, «si logramos conservar los grandes carnívoros que habitan alrededor de Los Ángeles, es un buen augurio para conseguirlo en cualquier otro lugar del país». IyC

PARA SABER MÁS

Individual behaviors dominate the dynamics of an urban mountain lion population isolated by roads. Seth P.D. Riley et al. en *Current Biology*, vol. 24, págs. 1989-1994, septiembre de 2014.
Survival and competing mortality risks of mountain lions in a major metropolitan área. John F. Benson, Jeff A. Sikich y Seth P.D. Riley en *Biological Conservation*, vol. 241, artículo n.º 108294, enero de 2020.
Minimum habitat thresholds required for conserving mountain lion genetic diversity. Justin A. Dellinger et al. en *Ecology and Evolution*, vol. 10, págs. 10687-10696, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El jaguar: genes y conservación. Manuel Ruiz García en *IyC*, junio de 2013.
Tras la pista del tigre. K. Ullas Karanth en *IyC*, julio de 2016.
Aplicación de la genética a la conservación del lince ibérico. Elena Marmesat, María Lucena-Pérez y José A. Godoy en *IyC*, abril de 2018.

por Harini Barath

Las fascinantes mariposas de cristal

Una nueva investigación revela el modo en que se desarrollan sus alas transparentes

Fieles a su nombre, las mariposas de cristal despliegan unas alas notoriamente transparentes con las que consiguen pasar inadvertidas ante los mismos ojos del observador. Una nueva investigación ha demostrado que el secreto de la práctica invisibilidad de ciertas partes de sus alas reside en la combinación de unas delgadas escamas filiformes con un recubrimiento ceroso de propiedades antirreflectantes.

Los colores vibrantes de la mayoría de las mariposas y las polillas emanan de las escamas planas que, imbricadas como tejas, recubren la superficie alar; pocas especies poseen alas transparentes. Nipam Patel, biólogo evolutivo y del desarrollo en el Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, en Massachusetts, investigó primero las alas de varias de estas últimas con sus alumnos en una clase de embriología. «Fue fantástico, dieron con todos los modos imaginables de crear un ala invisible: desde escamas transparentes hasta prescindir totalmente de escamas de cualquier tipo.»

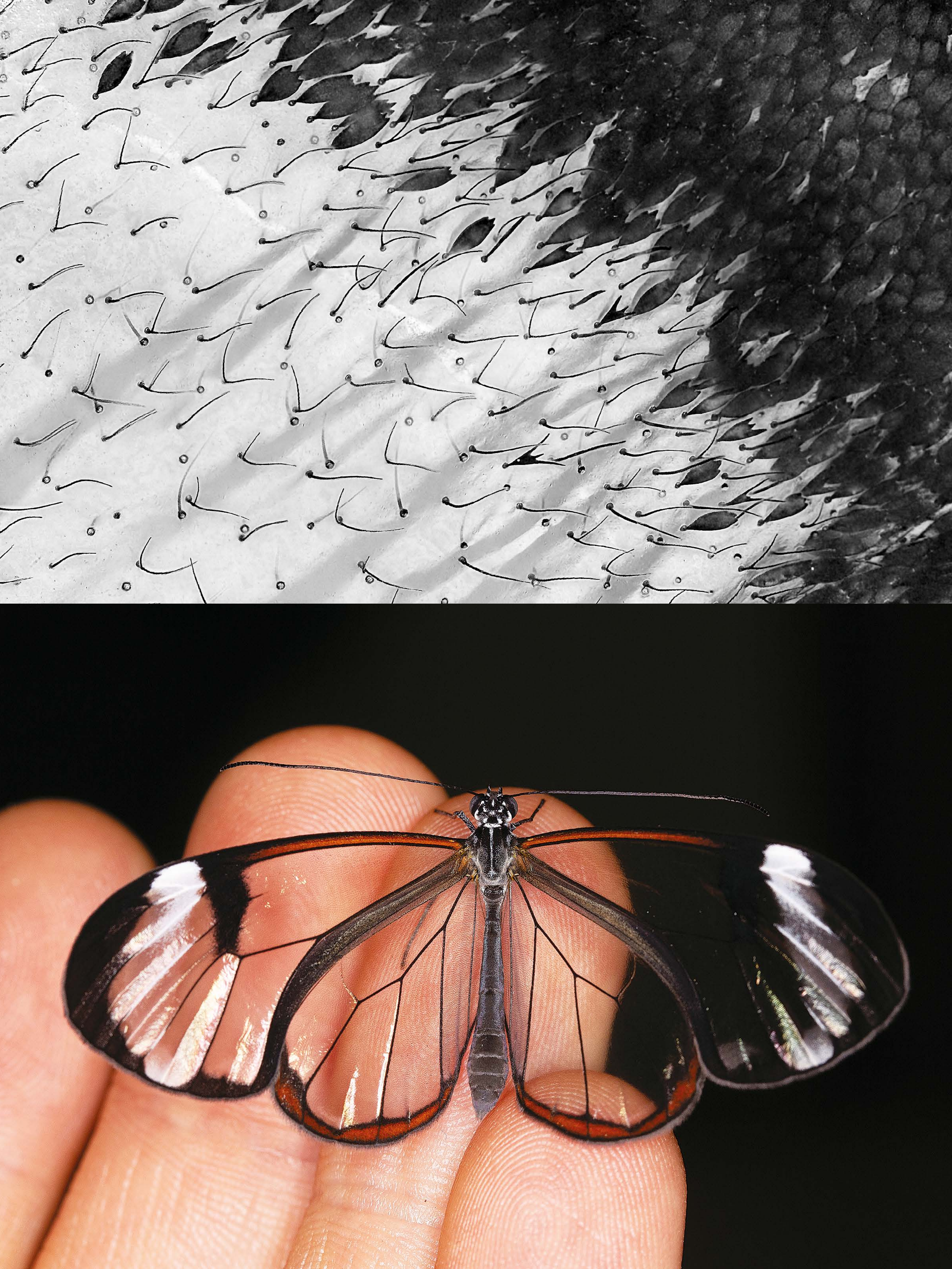
Los estudios precedentes que habían explorado la diversidad estructural y las propiedades ópticas de la transparencia alar se habían basado en especímenes adultos conservados en los museos, de ahí que los procesos de desarrollo que conducen a la transparencia no se conociesen con detalle. En el nuevo estudio, que ha visto la luz en el *Journal of Experimental Biology*, Patel y sus colaboradores criaron mariposas de cristal y siguieron el desarrollo de las alas, lo que ha supuesto el primer registro cronológico pormenorizado del proceso. Han observado que de las zonas transparentes de las alas brotan de forma dispersa cerdas delgadas y escamas anchas (*arriba derecha*), y lo hacen a partir de menos células precursoras que otras especies de mariposas.

No por ser incolora un ala deja de emitir reflejos, así que las mariposas han ideado formas de atenuar la luz reflejada. Gracias a un microscopio electrónico de gran potencia, los investigadores consiguieron examinar de cerca las nanocolumnas, minúsculas estructuras que evitan los reflejos y que aparecen esparcidas por la superficie de las alas de vidrio. El equipo pudo ver una capa de nanocolumnas separadas a espacios regulares y formada de quitina (sustancia fibrosa presente en el exoesqueleto de los insectos), la cual sustenta otra capa irregular de nanocolumnas formada en su caso por una sustancia cerosa que reduce notablemente los reflejos. Afirman que este descubrimiento podría inspirar nuevos materiales antirreflectantes.

El estudio supone también un punto de partida para futuras investigaciones acerca de los mecanismos genéticos que determinan el color (o la ausencia de este) en las mariposas y las polillas, opina Robert Reed, ecólogo de la Universidad Cornell que no ha participado en el trabajo. «Las escamas son la innovación evolutiva que caracteriza a los lepidópteros, así que resulta destacable que algunas especies hayan invertido el proceso y hayan renunciado al color», señala Reed.

—Harini Barath





por Sara Lumbreras

Sara Lumbreras es profesora en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI de la Universidad Pontificia Comillas e investigadora en el Instituto de Investigación Tecnológica, de la misma universidad.



Es hora de exigir explicaciones a la inteligencia artificial

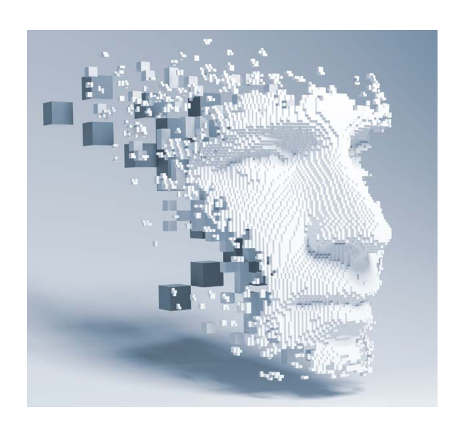
El campo emergente conocido como inteligencia artificial interpretable puede resolver los problemas más importantes de los algoritmos actuales

La inteligencia artificial (IA) ha entrado progresivamente en nuestra rutina, con operaciones que van desde personalizar la publicidad que vemos en Internet hasta determinar si nuestra última compra con tarjeta de crédito es sospechosa de fraude. En la gran mayoría de los casos, estas decisiones se delegan en los denominados «algoritmos de caja negra»: aquellos en los que no es posible expresar de manera explícita la regla utilizada para la decisión. Sabemos qué responde la máquina ante cada caso, pero nunca por qué. A medida que la IA expande su ámbito de aplicación, este proceder «ciego» está generando problemas cada vez más serios.

Llamó la atención del público por primera vez el caso de ProPublica, una empresa que diseñó una caja negra para predecir si los presos estadounidenses acabarían reincidiendo o no, una información que luego se empleaba para decidir si se les concedería la libertad condicional. Tras un análisis detallado, se hizo evidente que el algoritmo era, de alguna manera, «racista»: a los presos afroamericanos se les asignaban, con independencia de su historial, peores predicciones que a los blancos, asumiendo que reincidirían con mayor frecuencia. Para comprender este problema, conocido como «sesgo algorítmico», es necesario profundizar en lo que realmente son la IA y los métodos de aprendizaje automático.

El primer problema de estas herramientas es su mismo nombre. Por muy útiles que sean sus aportaciones, es imprescindible reconocer que no existe en ellas ningún sujeto inteligente y tampoco nada que aprenda, ya que se basan en técnicas meramente mecánicas. El aprendizaje automático no es nada más —y nada menos— que un proceso de identificación de patrones en unos datos de entrada y su aplicación a casos nuevos. A la máquina se le entregan datos en forma de ejemplos de problemas resueltos, y después generaliza a otros nuevos empleando los patrones identificados.

En la mayoría de los métodos usados hoy, estos patrones nunca se hacen explícitos, con lo que nos encontramos con las cajas negras. Estas incluyen, entre otras técnicas, las denominadas redes neuronales artificiales. La técnica conocida como aprendizaje profundo añade un factor de confusión adicional, ya que en esencia resulta idéntica al aprendizaje automático, solo que cuantitativamente mayor: con más elementos y mayores necesidades de cálculo. Nada hay de profundidad ni de comprensión. Una red neuronal con pocas neuronas es aprendizaje automático; con muchas, aprendizaje profundo.



El problema de ProPublica se debía a que, en los datos de entrenamiento (que tenían la forma de historiales de presos, incluida información sobre si acabaron reincidiendo o no), se encontraban sobrerrepresentados los afroamericanos reincidentes. Esto llevó al algoritmo a concluir que los afroamericanos reinciden en mayor medida, y así lo incorporó en sus predicciones. El sesgo contra las personas de raza negra lo introduce el mismo algoritmo en su funcionamiento correcto, de ahí el nombre de sesgo algorítmico.

Otro ejemplo reciente es el que emergió en una red social que señalaba con mucha más frecuencia las fotos de mujeres no blancas como contenido inapropiado. Al parecer, el algoritmo se entrenaba con fotografías publicitarias como ejemplo de contenido válido, y con pornografía como ejemplo de contenido no permitido. Aparentemente la base de datos de pornografía era mucho más racialmente diversa que la de publicidad, lo que llevó al algoritmo a generalizar con más facilidad que la foto de una mujer no blanca correspondía a contenido inapropiado.

En los algoritmos de caja negra solo es posible detectar el sesgo a posteriori y tras haber realizado análisis específicos. Por ejemplo, en el caso de ProPublica, tendríamos que enviar perfiles similares de presos de diferente raza y después comparar las respuestas. Pero, si no nos percatamos de que la raza era un problema al construir nuestra base de datos, ¿cómo se nos podría ocurrir llevar a cabo semejantes pruebas? ¿Y si el sesgo perjudica no según la raza, sino según alguna combinación más compleja de rasgos, como por ejemplo afroamericanos jóvenes y pobres?

A ello debemos añadir el riesgo de «sobreajuste», también derivado de la generalización de ejemplos. Imaginemos que entrenamos el algoritmo de ProPublica con un número relativamente pequeño de historiales y que, por pura casualidad, resulta que los convictos cuya foto tiene un ligero reflejo en la esquina superior izquierda son exactamente los reincidentes. Si, por mera coincidencia en los datos, existiese ese patrón, la máquina lo detectaría y lo emplearía para basar sus predicciones. Al estudiar su tasa de aciertos, parecería que el algoritmo anticipa la reincidencia con gran precisión. Sin embargo, fallaría es-

GETTY IMAGES/MAKSIM TKACHENKO/ISTOCK

trepitosamente al aplicarlo a historiales nuevos, ya que los patrones que ha extraído no tienen sentido; es decir, no se corresponden con ningún fenómeno conocido o comprobable.

Abandonar una decisión tan importante como la concesión de libertad condicional a un sistema automático puede llevar a injusticias que, por si fuera poco, permanecerán escondidas en las opacas entrañas de la caja negra. Estas injusticias, no debemos olvidar, son responsabilidad de los seres humanos que se apoyan en una máquina así para tomar tamañas decisiones.

Una decisión relevante nunca debería ser simplemente delegada en una máquina. Antes bien, deberíamos ver la IA solo como una ayuda. Una ayuda valiosa pero solo eso: un dato adicional que nos puede servir de apoyo a la hora de tomar una decisión o que aumenta la rapidez con que podemos acometerla.

Si la IA solo fuera una técnica más para ayudar al ser humano a tomar decisiones, que el aprendizaje automático no aprenda y que las cajas negras no comprendan no debería ser un inconveniente. Sin embargo, sí que presenta un problema adicional que a menudo pasa inadvertido: no es solo que las máquinas no comprendan, sino que tampoco nos dejan comprender.

En este punto resulta clave distinguir entre la comprensión del algoritmo y la comprensión de la decisión que este genera. Podemos tener un acceso total al código del algoritmo y a los pasos que establece para resolver un problema. Sin embargo, de su complejidad interna pronto emergerá una oscuridad total. Aunque sus mecanismos sean simples, el resultado es «complejo», en el sentido en que las ciencias de la complejidad emplean esta palabra: un sistema complejo es uno en el que unas pocas reglas simples dan lugar a fenómenos que no pueden deducirse a partir de esas mismas reglas. Sabemos cómo funciona el algoritmo, pero no somos capaces de predecir ni explicar sus resultados.

Todo esto podría llevarnos al desánimo. A asumir que, o bien renunciamos a nuestra necesidad de comprender y aceptamos dejar nuestro destino en manos de las cajas negras, o bien nos convertimos en neoluditas cerrados a los progresos de la técnica y perdemos las oportunidades que la IA —pese a lo desacertado de su nombre— nos propone. La buena noticia es que lo anterior no es cierto. Hay una tercera vía: pedir explicaciones a la IA. Existen alternativas técnicamente viables a los algoritmos de caja negra, las cuales se desarrollarán al ritmo que la sociedad las demande. De hecho, hay dos maneras principales de «abrir» la caja negra.

La primera consiste en el uso de «modelos subrogados». Estos constituyen versiones simplificadas de la caja negra, pero que tienen el potencial de ser comprendidos por las personas. Sin embargo, el modelo subrogado es distinto de la caja negra y, por tanto, puede dar lugar a decisiones diferentes, por lo que comprender las decisiones de uno no significa haber comprendido las del otro. Además, las técnicas para construir modelos subrogados son tremendamente complejas.

Entonces, ¿por qué no utilizar un modelo simple y que podamos comprender de manera directa? Esto es precisamente lo que pretende la IA interpretable. Las alternativas con mejor potencial de interpretación incluyen los modelos basados en puntuaciones, en los que pasamos lista a una serie de criterios y asignamos puntuaciones según las respuestas a modo de test, que sumamos al final. Contamos también con las regresiones logísticas, muy útiles a la hora de tratar con problemas binarios (aquellos cuya solución es «sí» o «no»), en los cuales una media ponderada de puntuaciones se transforma mediante una función que hace que los resultados encajen dentro del intervalo comprendido entre 0 y 1, con lo que pueden representar la probabilidad de un evento. También son extremadamente útiles los árboles de decisión, en los que varias preguntas encadenadas nos llevan a lo que será el resultado final.

Con frecuencia, desarrollar estos modelos simples requiere un trabajo laborioso de un equipo interdisciplinar, en el que no solo se entrena a una máquina (lo cual suele realizarse mecánicamente en los algoritmos al uso), sino que se interactúa repetidas veces con el modelo hasta encontrar una solución que no solo sea estadísticamente aceptable, sino que tenga también sentido para el experto.

En algunos casos, desarrollar modelos interpretables resulta técnicamente difícil, si no imposible, como ocurre con el procesamiento de imágenes o de voz. Sin embargo, no son éstas las aplicaciones de la IA con mayor impacto en nuestra vida. En datos estructurados, como los de los historiales delictivos o médicos, es con frecuencia posible desarrollar modelos interpretables que funcionan prácticamente igual de bien que las cajas negras. Además, conviene tener en cuenta que, a menudo, cuando parece que las cajas negras realizan predicciones casi perfectas, tras los resultados se esconden los fantasmas del sesgo algorítmico y del sobreajuste.

Por ejemplo, Cynthia Rudin, de la Universidad Duke, desarrolló en 2019 una alternativa a la caja negra de ProPublica. El sistema consistía en un esquema simple de puntuaciones para variables transparentes como la edad, el número total de crímenes y, en especial, de crímenes violentos. Este modelo tiene un poder predictivo muy similar al de la caja negra de ProPublica, pero es completamente transparente y está libre de sesgo algorítmico.

Los modelos interpretables nos ofrecen algo que debemos empezar a exigir a la IA: que solo es válido aquel modelo en el que podemos confiar; y que solo podemos confiar en algo que comprendemos y que, además, tiene sentido cuando lo ponemos en relación con la experiencia previa y el sentido común. Tenemos derecho a —y es nuestra responsabilidad— pedir explicaciones.

Esta nueva etapa de la IA requiere un cambio de paradigma. De la delegación de las decisiones, a las herramientas de apoyo a la decisión; de las cajas negras, a los modelos transparentes; del modelo generado automáticamente, al trabajo de un equipo multidisciplinar. Solo desde esta perspectiva podemos superar la confusión a la que nos enfrentamos y reorientar los avances de este campo para que sirvan al ser humano en libertad y responsabilidad. IyC

PARA SABER MÁS

¿Puede la máquina sustituir al hombre? Una reflexión jurídica sobre el ojo clínico y la responsabilidad en tiempos del Big Data. Federico de Montalvo Jääskeläinen en *Razón y Fe*, vol. 278, págs. 323-334, noviembre de 2018.

Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. Cynthia Rudin en *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, págs. 206-215, mayo de 2019.

Artificial intelligence: A modern approach. Stuart Russell y Peter Norvig, 4.ª edición. Pearson, 2021.

Interpretable machine learning: A guide for making black box models explainable. Christoph Molnar. Leanpub, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El problema de la caja negra. Davide Castelvecchi en *IyC*, abril de 2017.

El traje nuevo de la inteligencia artificial. Ramon López de Mántaras en *IyC*, julio de 2020.

Los sesgos de los algoritmos. Ricardo Baeza-Yates en *IyC*, octubre de 2021.

por José Manuel Muñoz



José Manuel Muñoz es investigador del Grupo Mente-Cerebro en el Instituto Cultura y Sociedad de la Universidad de Navarra, así como del Centro Internacional de Neurociencia y Ética de la Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno. Es secretario académico de la Asociación Mexicana de Neuroética y miembro de la Sociedad Internacional de Neuroética.

Protejamos la privacidad mental

El auge de los dispositivos neurotecnológicos de uso doméstico debe alertarnos sobre el destino de nuestros neurodatos

En el capítulo *Toda tu historia* de la aclamada serie *Black Mirror* aparece un mundo en el que los dispositivos neurotecnológicos permiten acceder a los recuerdos de otros y compartirlos con ellos, lo que lleva a sus protagonistas a situaciones indeseadas. ¿Nos acercamos a una sociedad así, en la que nuestros pensamientos quedarán totalmente expuestos? Muchas voces alertan sobre ciertos proyectos destinados, por ejemplo, a desarrollar interfaces no invasivas que permitan escribir textos a partir de nuestra actividad mental, como la AlterEgo, del MIT, o la impulsada —y recién aparcada— por Facebook. Pero, pese a lo que pueda parecer, dichas interfaces no pueden leer pensamientos, pues decodifican impulsos nerviosos enviados a los órganos bucales encargados de articular el lenguaje. Así, solo pueden leer palabras que el usuario previamente ha decidido expresar.

Ahora bien, hay motivos razonables para preocuparse de que nuestros neurodatos (datos cerebrales) sean obtenidos y empleados con fines no estrictamente médicos. Desde luego, se está lejísimos de poder diseñar dispositivos que accedan a pensamientos o recuerdos, pero es mucho lo que hoy puede inferirse sobre la vida mental a partir de los neurodatos: estados emocionales, nivel de estrés o concentración, intenciones motoras, e incluso estímulos sensoriales.

Si bien los primeros equipos que obtenían estos datos eran caros, voluminosos y de uso profesional, en los últimos años ha proliferado la venta de pequeños dispositivos de uso no supervisado, como diademas y cascos de electrodos, a través de mercados virtuales. Estos dispositivos son aún bastante ineficaces, lo que no impide que puedan recoger información sensible. Además, la mejora de su precisión a medio plazo hará aumentar su comercialización, cuya tendencia apunta en dos direcciones: controlar aparatos y dispositivos (teléfonos móviles, ordenadores, electrodomésticos, videoconsolas, vehículos) mediante órdenes y contraseñas mentales, y monitorizar parámetros sobre la atención, la motivación o la emoción.

Actualmente, el reglamento de protección de datos de la Unión Europea regula el acceso, modificación y supresión de los datos del usuario. Sin embargo, los neurodatos poseen dos rasgos que los hacen escapar a dicha protección. Por un lado, son mezclables: se combinan con los de otras personas, lo que dificulta su identificación y recuperación. Por otro, son reinterpretables: los datos que hoy no parecen sensibles podrían serlo en un futuro si, con el avance tecnológico, arrojan nueva información sobre el usuario, lo que puede atentar contra su dignidad incluso después de fallecido. Parece acertado así que un grupo internacional de expertos haya elaborado una propuesta de marco de gobernanza para este tipo de datos.



Los neurodatos ofrecen información indirecta, pero relevante, sobre el ámbito mental. Su uso por parte de compañías y Gobiernos, en combinación con la que dejamos en buscadores y redes sociales, podría suponer una amenaza inaudita para la intimidad individual y una bomba de relojería a nivel social, con consecuencias impredecibles. No es de extrañar, por tanto, que la Fundación NeuroRights, liderada por Rafael Yuste, haya propuesto neuroderechos universales, entre los que se halla la privacidad mental, junto al libre albedrío, la identidad, el acceso justo a la neurotecnología y la protección contra sesgos. Como alternativa, Marcello Ienca y Roberto Andorno proponen los derechos a la privacidad, integridad y continuidad mentales, así como a la libertad cognitiva.

Durante este año, los neuroderechos se han introducido en la Constitución chilena, la Carta de Derechos Digitales española y un proyecto de ley brasileño sobre neurodatos. También la ONU pretende evaluarlos con vistas al 75º aniversario de la Declaración Universal de Derechos Humanos. Cabe señalar que aún hay numerosas cuestiones pendientes: ¿cómo debemos definir los neuroderechos?, ¿deben ser absolutos o relativos?, ¿son novedosos o redundantes con los que ya existen?, ¿cómo deben ajustarse a los diversos contextos culturales y normativos? Pese a ello, el derecho a la privacidad mental despierta el consenso más amplio entre los expertos, siendo el único en el que coinciden las propuestas de Ienca-Andorno y Yuste.

El dilema del control plantea una disyuntiva en la regulación de una nueva tecnología: adelantarnos a su afianzamiento basándonos en temores no confirmados, o evaluar su impacto real cuando se haya consolidado. Para situar mi posición, permítaseme acudir a estas palabras de Ramón y Cajal en su libro *Charlas de Café*, publicado hace un siglo: «Casi todos los males de pueblos e individuos dimanan de no haber sabido ser prudentes y enérgicos durante un momento histórico, que no volverá jamás». La implementación masiva de la telefonía inteligente y las redes sociales ha traído repercusiones éticas inesperadas y, pese a los esfuerzos normativos actuales, difícilmente reversibles. Ojalá el debate público sobre la neuroprivacidad no llegue, también, demasiado tarde.

GETTY IMAGES/IURII MOTOV/ISTOCK

por José Manuel López Nicolás



José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.

Los insectos en nuestra dieta

Cinco preguntas clave sobre la entomofagia

La reciente autorización en la Unión Europea del primer insecto apto para el consumo, el descubrimiento de nuevas ventajas asociadas a su ingesta y la descripción de posibles riesgos para nuestro organismo han avivado el debate sobre la entomofagia, o consumo de insectos. Respondamos a las cinco preguntas más frecuentes que se plantean acerca de este innovador campo de la alimentación.

¿Qué insectos hay disponibles en el mercado? Aunque se han documentado casi 2000 especies de insectos aptas para el consumo humano, hasta hace algunos meses solo se ingerían en países de África, América, Asia y Oriente Medio. Ejemplos destacados son el consumo de gusanos en México, de orugas en Namibia, de saltamontes fritos en Tailandia o de larvas de avispa vivas en Japón. Pero con la entrada en vigor del Reglamento Europeo 2015/2283 relativo a los nuevos alimentos, desde hace unos años se ha regulado que los insectos enteros o partes de ellos entren a formar parte de nuestra dieta. Gracias a este nuevo marco legislativo, y a un informe de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria que tiene en cuenta aspectos nutritivos, toxicológicos, químicos y microbiológicos, los Estados miembros han aprobado en 2021 una propuesta de la Comisión Europea de conceder la primera autorización para comercializar un insecto en la UE. Se trata de la larva del gusano amarillo de la harina (*Tenebrio molitor*), que puede consumirse entera, como aperitivo, o utilizarse como ingrediente en galletas, productos de panadería, embutidos y sustitutos de la carne, así como en alimentos deportivos o suplementos. Además, también puede emplearse para la alimentación y suplementación de los animales domésticos y de granja.

¿Qué ventajas tiene la entomofagia? Una de las más destacadas es el valor nutritivo. Los insectos proporcionan proteínas de alto valor biológico (las que se absorben con gran eficacia) y presentan un elevado contenido en ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados. También son ricos en algunos minerales (manganeso, fósforo, selenio, cobre, hierro, magnesio y zinc) y vitaminas (biotina, riboflavina, ácido pantoténico y ácido fólico).

La segunda gran ventaja es de tipo ambiental. La producción de insectos necesita menos terreno y agua que la de otros animales. Por ejemplo, cada gramo de proteína de carne de ternera requiere entre 8 y 14 veces más tierra y unas 5 veces más agua que un gramo de proteína de insectos. Además, necesitan menos cantidad de alimentos (restos agrícolas, estiércol) que otros animales para producir la misma cantidad de proteínas. Por último, resultan menos contaminantes, ya que generan menos amonio y emiten menos metano y gases de efecto invernadero: los grillos producen hasta un 80 por ciento menos metano que las vacas y entre 8 y 12 veces menos amoníaco que los cerdos; y los insectos liberan entre 6 y 13 veces menos dióxido de carbono que el ganado vacuno.



GETTY IMAGES/FPWING/ISTOCK

¿Por qué produce rechazo su consumo? La actitud de las personas ante los alimentos no solo viene condicionada por la composición química, los aspectos nutricionales, la estructura y las propiedades físicas de estos. También influyen mucho la edad del consumidor, el sexo y, sobre todo, la aceptación psicológica del alimento. Este último factor, el rechazo psicológico a la ingesta de grillos, hormigas o gusanos, es la principal razón de la aversión mostrada por muchos consumidores.

¿Tiene riesgo la entomofagia? Aunque la probabilidad de intoxicación es baja, un informe reciente de la FAO apunta a tres tipos de riesgos. El primero es nutricional y hace referencia a las reacciones indeseadas en las personas que también son alérgicas a los crustáceos. Ello se debe a la reactividad cruzada que puede existir entre los dos tipos de alimentos, puesto que ambos grupos de animales comparten moléculas homólogas.

El segundo riesgo es de tipo microbiológico. Los insectos pueden ser un vector de otros microorganismos perjudiciales, como *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas* o *Clostridium*. Además, pueden actuar como vehículos para bacterias que portan genes de resistencia a los antimicrobianos y para virus infecciosos.

El tercer riesgo es de origen químico. Los insectos criados con residuos agrícolas pueden estar contaminados con micotoxinas, plaguicidas, metales tóxicos y dioxinas. Además, el estiércol de ganado y aves de corral para la cría de insectos puede contener antimicrobianos y plaguicidas.

¿Cuál es el futuro de la entomofagia? Se ha previsto que el mercado de alimentos a base de insectos crezca un 25 por ciento anual entre los años 2018 y 2023, y que en 2027 alcance una facturación de 4000 millones de euros. Sin embargo, para alcanzar estos objetivos es necesario que se superen las barreras psicológicas que impiden su consumo mayoritario, ya que actualmente en Europa solo el 10 por ciento de las personas afirman estar dispuestas a reemplazar la carne por los insectos. Veremos qué ocurre.

COSMOLOGÍA

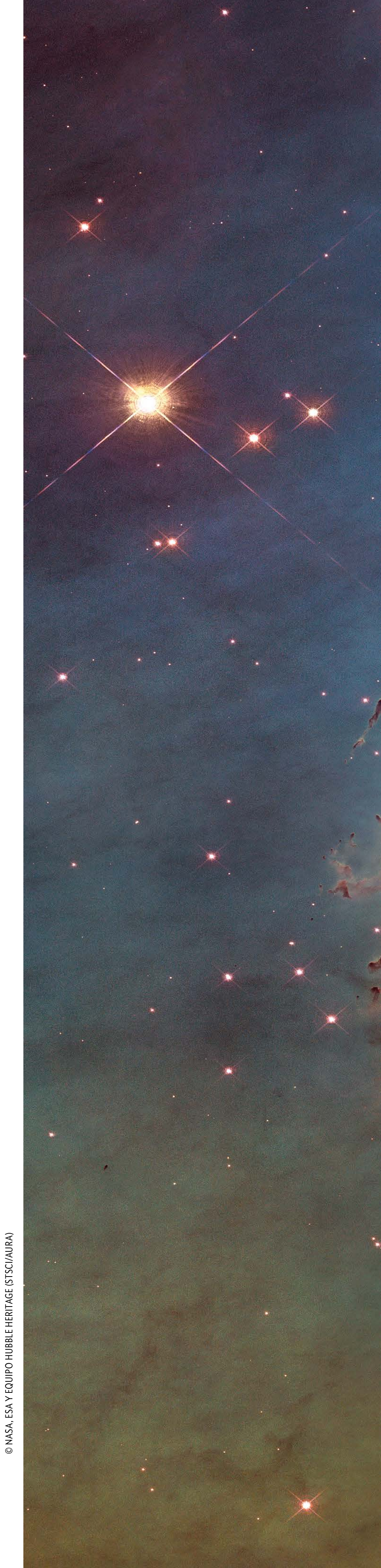
¿Hay que revisar el modelo cosmológico?

Los resultados incompatibles de ciertas observaciones invitan a poner a prueba las hipótesis en las que se basa el modelo de la gran explosión

Jean-Philippe Uzan

En tan solo un siglo, los astrofísicos han construido un modelo matemático y físico de nuestro universo. Este modelo cosmológico estándar, también llamado de la gran explosión, se ha ido imponiendo progresivamente porque ha permitido interpretar y conciliar una gran cantidad de observaciones, y porque ofrece una visión coherente de la historia cósmica. No obstante, hay preguntas sobre los primeros instantes del universo y la naturaleza de su contenido material que aún aguardan respuesta.

Al margen de estos enigmas, algunas observaciones recientes han generado tensiones dentro del modelo. Eso afecta en particular a la constante de Hubble, que refleja el ritmo de expansión actual del universo, y también a la densidad media de materia bariónica (la materia ordinaria). Estas cantidades se han medido empleando diversos métodos basados en observables muy diferentes, y los resultados se han demostrado incompatibles. Los astrofísicos tratan de entender el origen de tales desacuerdos: ¿hay algún problema con las observaciones o se trata de una mala interpretación de los datos?





LOS «PILARES DE LA CREACIÓN», una nube de gas fotografiada por el telescopio espacial Hubble, evocan las hipótesis en las que se apoya el modelo cosmológico estándar. Los avances observacionales pueden ponerlas en cuestión, así que es importante comprobar su solidez.

Esas tensiones emergen en el contexto de un marco conceptual muy concreto, el modelo de la gran explosión, que se ha ido construyendo poco a poco. Aunque al principio era eminentemente cualitativo y estaba poco limitado por las observaciones, fue evolucionando gracias a los avances teóricos y técnicos. Así, los investigadores han ido refinando su descripción del universo, haciéndola más cuantitativa. Hoy, los parámetros del modelo cosmológico estándar se miden con una precisión del orden de unos pocos puntos porcentuales. Y es por ello que hablamos de «cosmología de precisión».

Otra manera de abordar dichas tensiones es tener presente que todo modelo, incluido el de la gran explosión, reposa sobre un conjunto de supuestos que debemos cuestionar permanentemente. Conforme aumenta la precisión de las medidas, hay que preguntarse si esas hipótesis (y por tanto el modelo mismo) siguen siendo adecuadas para interpretar las observaciones. ¿Es preciso modificar o abandonar alguna de ellas? Junto a numerosos colegas, he explorado esta línea de pensamiento. Al poner a prueba las hipótesis del modelo de la gran explosión, nuestro objetivo es consolidar y mejorar la base sobre la que reposa y, en última instancia, identificar pistas que permitan resolver las preguntas abiertas y las tensiones existentes.

Un modelo, tanto en cosmología como en la ciencia en general, es un marco teórico que ofrece una descripción simplificada de un fenómeno y que está abocado a evolucionar. Hay que aceptar, por ejemplo, que algunas cuestiones queden fuera de su campo explicativo en un momento dado. Los primeros modelos cosmológicos de la década de 1920, construidos sobre la relatividad general de Einstein, describían la materia como un «gas» de estrellas o galaxias completamente caracterizado por su densidad media. Por su propia naturaleza, esos modelos no permitían estudiar la formación y evolución de las galaxias. Aun así, sirvieron para establecer un resultado importante: lejos de ser estático, el universo se expande. El ruso Alexander Friedmann y el belga Georges Lemaître predijeron esta dinámica, que luego confirmaría en 1929 el astrónomo estadounidense Edwin Hubble al medir la velocidad de recesión de las galaxias en función de su distancia. Pese a sus limitaciones iniciales, ese modelo cosmológico proporcionó el marco para construir nuestra visión actual del universo.

UNA CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS

El modelo cosmológico experimentó una notable evolución desde finales de los años treinta. Físicos como Robert Herman, Ralph Alpher y George Gamow pusieron de manifiesto las implicaciones del hecho de que, en un espacio en expansión, la materia inevitablemente se diluye y se enfría. Eso significa que, si retrocedemos en el tiempo, el universo debería hallarse en un estado cada vez más denso y caliente. Estos investigadores dedujeron que los núcleos atómicos ligeros (hidrógeno, deuterio, helio y trazas de litio) no podían existir en el universo primitivo y se sintetizaron en los primeros minutos de la historia cósmica. (Los elementos restantes no se formaron hasta más tarde, principalmente en el interior de las estrellas.)

Jean-Philippe Uzan es cosmólogo del Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia. Trabaja en el Instituto de Astrofísica de París y es autor de *Big Bang: Comprendre l'univers depuis ici et maintenant* (Flammarion, 2018).



También hemos comprendido que, unos 380.000 años después de la gran explosión, la materia pasó de estar ionizada a ser neutra, cuando los núcleos atómicos se unieron a los electrones del medio. Eso hizo que el universo se volviera transparente a la radiación electromagnética (los fotones), que comenzó a propagarse libremente. Hoy, esos fotones forman el fondo de radiación de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Estas dos predicciones —la abundancia de elementos ligeros y el CMB— han sido confirmadas por las observaciones y constituyen dos argumentos de peso a favor del modelo cosmológico estándar.

A partir de los años sesenta, el modelo evolucionó para incluir la cuestión del origen y la evolución de la estructura a gran escala del universo. Gracias al desarrollo de las simulaciones por ordenador y al aumento de las observaciones, los astrofísicos pudieron comenzar a estudiar cómo se forman las galaxias y los cúmulos de galaxias. Más aún, desde la década de 1980, los cosmólogos teóricos se han ocupado de la dinámica del universo primitivo y han formulado la teoría inflacionaria, que da cuenta de las «semillas» necesarias para poner en marcha la formación de las grandes estructuras.

Estas cuatro grandes etapas en la construcción del modelo de la gran explosión ponen de manifiesto su estructura modular. Cada paso en el desarrollo de la teoría complementa al prece-

MODELOS ALTERNATIVOS

El modelo del estado estacionario

En la década de 1940, Fred Hoyle y sus colaboradores formularon el modelo cosmológico del estado estacionario, donde una creación continua de materia compensaba la dilución causada por la expansión del universo. En tal caso no habría habido una fase primordial de alta densidad y temperatura. Durante algún tiempo esta propuesta rivalizó con el modelo de la gran explosión, pero acabó siendo abandonada, principalmente debido al descubrimiento del fondo de radiación de microondas.

EN SÍNTESIS

El modelo cosmológico estándar descansa sobre ciertas hipótesis, como que la naturaleza está descrita por la relatividad general y la física cuántica, o que el universo es homogéneo e isótropo.

En los últimos años, diferentes mediciones de cantidades como la constante de Hubble o la densidad de materia ordinaria han arrojado resultados contradictorios.

Dada la precisión de las observaciones, puede que las hipótesis del modelo cosmológico empiecen a ser inadecuadas. Los investigadores buscan maneras de ponerlas a prueba.

El modelo de la gran explosión

Partiendo de la teoría de la relatividad general y de la física de partículas, los cosmólogos desarrollaron un marco teórico para describir la historia del cosmos: el modelo de la gran explosión. Nuestro universo habría surgido de una fase muy densa y caliente, hace 13.800 millones de años. Al expandirse se ha ido enfriando y posee una rica historia térmica. El modelo describe de manera satisfactoria un gran número de observaciones, como el fondo de radiación de microondas, la abundancia de elementos ligeros o la formación de estructura a gran escala.

1 INFLACIÓN

Época y temperatura desconocidas
Esta fase, la más temprana y especulativa del modelo cosmológico, explicaría la homogeneidad del universo a gran escala y el origen de sus grandes estructuras.

2 BARIOGÉNESIS

Entre 10^{-32} y 10^{-12} segundos (después de la gran explosión)
Período aún mal comprendido que describe la formación de los bariones y la aparición de la asimetría entre materia y antimateria.

3 NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

Entre 10^{-3} y 300 segundos/10^{11} y 10^{9} kelvin
Se forman los núcleos atómicos ligeros (hidrógeno, deuterio, helio y litio)

4 FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS (CMB)

380.000 años/10^{4} kelvin
Los núcleos atómicos y los electrones se combinan para formar átomos neutros. Eso permite que la radiación electromagnética viaje libremente y constituya el CMB.

5 PRIMERAS ESTRELLAS

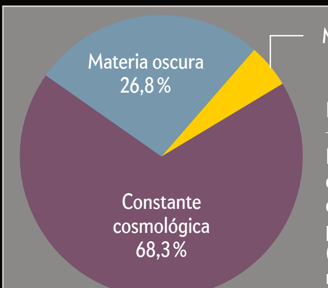
En torno a 400 millones de años
Tras la emisión del CMB, el universo carece aún de estrellas y galaxias. Esta «edad oscura» llega a su fin con la formación de las primeras estrellas.

6 EXPANSIÓN ACELERADA

En torno a 6000 millones de años
La expansión del universo diluye la materia y la radiación. Como resultado, la energía oscura se convierte en la componente dominante y acelera la expansión.

7 EL UNIVERSO ACTUAL

13.800 millones de años/2,73 kelvin



LA COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

Distintas observaciones han permitido calcular el contenido energético del universo actual. La constante cosmológica es la componente dominante (68,3 por ciento), seguida por la materia oscura (26,8 por ciento) y la materia ordinaria (4,9 por ciento). Los fotones y los neutrinos no representan más que una pequeña fracción de este balance total.

CUESTIONES PENDIENTES

Todavía quedan aspectos del modelo cosmológico por dilucidar, como la naturaleza de la materia y la energía oscuras. La física en la que se basan la inflación y la bariogénesis, dos fases del universo primordial, aún es muy especulativa. Y para describir las etapas anteriores a la inflación necesitaremos una teoría cuántica de la gravedad.

dente, al abordar cuestiones que quedaban fuera del campo explicativo anterior y considerar nuevas observaciones. Algunos elementos del modelo son más sólidos que otros: la física del CMB o de la formación de los núcleos ligeros se basa en el electromagnetismo y la física nuclear, dos teorías bien comprobadas en los laboratorios. En cambio, la teoría de la inflación es más especulativa y, aunque está de acuerdo con las observaciones actuales, aún espera su consolidación tanto teórica como observacional [*véase* «La burbuja de la inflación cósmica», por Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb; Investigación y Ciencia, abril de 2017].

El modelo de la gran explosión define el marco teórico para predecir e interpretar las observaciones. Para ponerlo a prueba hay que pronosticar los resultados de las mediciones, lo cual requiere describir con precisión la propagación de la luz y los sesgos asociados a la posición del observador. Ese marco dicta, pero también restringe, las preguntas y afirmaciones que podemos hacer sobre el universo, ya que estas dependen de las hipótesis del modelo. Por ejemplo, la aserción de que el universo tiene 13.800 millones de años no es el resultado de una medida directa, sino una conclusión que se obtiene a partir de un conjunto de observaciones e hipótesis.

En la práctica, uno escoge los valores de los parámetros cosmológicos que proporcionan el mejor acuerdo entre las predicciones y una serie de observaciones. (El número de parámetros y su definición dependen del modelo; en el caso que nos ocupa hay principalmente seis.) A medida que aumenta la calidad de las observaciones, el cálculo de esos parámetros cosmológicos se va refinando. Así, dos observables cuyas medidas son cada vez más precisas pueden mostrar una discrepancia o tensión que no existía cuando la precisión era menor. Eso es justo lo que ocurre con la constante de Hubble.

En tal caso, debemos preguntarnos si el desacuerdo pone en cuestión los observables y su interpretación o alguna de las hipótesis del modelo, si se trata de un sesgo que habíamos podido ignorar hasta ese momento o está anunciado una «nueva física» aún por descubrir. Una única observación puede derribar todo el edificio teórico, pero hacer evolucionar el modelo es

CRONOLOGÍA CÓSMICA

¿Cuál es la edad del universo?

Se cree que el cosmos tiene 13.800 millones de años, pero no se trata de una observación directa. Podemos medir la edad de ciertos objetos astrofísicos y obtener un límite inferior para la edad del universo, pero esta última se deduce del modelo cosmológico en su conjunto. Por ello, el valor estimado se basa en una serie de hipótesis y observaciones.

Hemos de aclarar que con esa edad nos referimos al tiempo transcurrido entre la singularidad inicial y el momento actual, medido por un observador fundamental (un hipotético observador de referencia definido por el principio copernicano, para quien el tiempo propio es el tiempo cósmico, y con el que todo observador real puede comparar sus medidas). Recordemos que, en relatividad, el tiempo entre dos sucesos depende del estado de movimiento del observador. Así pues, la edad del universo es una cantidad teórica calculada a partir del modelo y que uno extrapola hasta la gran explosión.

En el marco del modelo cosmológico estándar, la estimación de la edad del universo presupone la validez de la relatividad general para describir la expansión, definir el desplazamiento al rojo y relacionarlo con el tiempo. También depende del principio copernicano, que selecciona las soluciones cosmológicas, conduce a la definición de los observadores fundamentales y permite interpretar todas las observaciones que respaldan el modelo. En un modelo inhomogéneo, por ejemplo, el ritmo de expansión sería diferente en cada punto del universo y el tiempo transcurrido desde la singularidad inicial dependería de la posición del observador. Por tanto, la edad del cosmos no sería un concepto «universal» y habría que precisar qué observador la mide.

Por último, los modelos se ajustan a partir de un conjunto de datos observacionales que sirven para determinar el valor más adecuado de los parámetros cosmológicos. Con todos estos elementos se puede calcular la edad del universo. Y lo mismo ocurre con otras afirmaciones sobre la cronología cósmica, como cuando decimos que el fondo de radiación de microondas se emitió 380.000 años después de la gran explosión.

más complicado. Es necesario formular un nuevo marco teórico, asegurándose de que sus predicciones sigan siendo compatibles con el conjunto de observaciones que explicaba el modelo anterior.

En principio, dos modelos distintos pueden estar de acuerdo con el mismo conjunto de observaciones. Aunque siempre es posible juzgar su credibilidad a partir de argumentos teóricos, lo más importante es identificar una situación donde cada modelo conduzca a predicciones lo bastante distintas como para distinguirlas. Y eso nos anima a reflexionar sobre observaciones o experimentos futuros.

Diferenciar entre dos modelos puede ser muy difícil. Pongamos un ejemplo. En 1998, al estudiar las supernovas de tipo Ia, dos equipos de astrofísicos demostraron que la expansión del universo se estaba acelerando, un resultado que mereció el premio Nobel de física de 2011. La explicación teórica más sencilla y económica era aceptar la existencia de una «constante cosmológica», un parámetro que puede aparecer en las ecuaciones de la relatividad general.

Esa opción ya estaba entre las posibilidades del modelo cosmológico estándar, así que no era necesaria ninguna revolución, y menos aún postular nuevas leyes físicas. Sin embargo, la interpretación física de la constante cosmológica como la energía del vacío plantea problemas teóricos relacionados con la compatibilidad entre la cosmología y la física cuántica. Por esta razón, se han explorado otras maneras de dar cuenta de la expansión acelerada. Por ejemplo, que estemos viviendo en una región con una densidad media menor que la correspondiente a escalas mucho más grandes, que exista algún nuevo tipo de materia (una «energía oscura» de naturaleza aún desconocida) o que falle la teoría de la relatividad general.

Hasta el momento, las observaciones no han mostrado ninguna desviación respecto a las predicciones del modelo estándar con una constante cosmológica. Así pues, todas las explicaciones alternativas deben ser indistinguibles de esta dentro de la precisión actual de las medidas, por lo que están muy constreñidas. La hipótesis de una simple constante cosmológica solo podría descartarse con futuras observaciones.

Esta discusión ilustra que las observaciones no son independientes del modelo. En realidad, uno juzga la credibilidad del conjunto modelo-observaciones. Un modelo es una herramienta, un consenso provisional, necesariamente limitado y abierto a evolución. Permite formular preguntas y otros modelos alternativos, a la vez que estimula la reflexión sobre cómo restringirlos y poner de manifiesto sus señales características. Eso lleva a mejorar la descripción teórica del modelo, que debe ser al menos tan precisa como las observaciones. La aparición de tensiones denota que el propio modelo no posee la exactitud necesaria para interpretar las observaciones.

Tras una veintena de años, algunos cosmólogos pretenden usar las observaciones no solo para medir los parámetros del modelo cosmológico estándar (por ejemplo, la constante de Hubble), sino también para poner a prueba la solidez de las hipótesis en las que se basa. Y es que tal vez estas ya no sean adecuadas para dar cuenta de los efectos más sutiles que podemos medir hoy en día. Pasaríamos así de una cosmología de precisión a una cosmología de exactitud. Pero, por supuesto, la precisión de las medidas y la exactitud del modelo van de la mano.

CUATRO HIPÓTESIS PRINCIPALES

¿Cuáles son las suposiciones en las que se basa el modelo cosmológico estándar? En retrospectiva, podemos distinguir cuatro hipótesis principales, que denotaremos como H1, H2, H3 y H4. Las dos primeras se refieren a leyes fundamentales de la naturaleza. Para empezar, suponemos que la teoría general de la relatividad es una buena descripción de la gravedad (H1). Eso implica que el universo se puede representar matemáticamente mediante un espaciotiempo cuya geometría determinamos a partir de las ecuaciones de Einstein. También asumimos que el modelo estándar de la física de partículas describe la materia y sus interacciones no gravitatorias: electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil (H2). Estas dos primeras hipótesis fijan el marco teórico del modelo.

Pero también hay que incluir la constante cosmológica y suponer la existencia de la materia oscura, un tipo de materia cuya naturaleza todavía no se ha determinado. Estos ingredientes se salen del marco teórico de referencia, pero ofrecen una explicación fenomenológica coherente para multitud de observaciones actuales (desde el CMB a la dinámica de las galaxias y los cúmulos, o los efectos de las lentes gravitatorias).

Ese marco teórico no constituye por sí mismo un modelo cosmológico. Debido a su gran generalidad, las ecuaciones de la relatividad general son muy complicadas de resolver, y para obtener soluciones los investigadores deben realizar una o varias hipótesis simplificadoras. De hecho, lo que buscan no es «la» geometría del universo, sino una solución aproximada que la describa lo bastante bien.

Según las observaciones, el universo parece ser esencialmente idéntico en todas direcciones. En primera aproximación, podemos suponer que es isótropo alrededor nuestro. Esta hipótesis de isotropía se suplementa con el principio copernicano, que establece que no ocupamos una posición privilegiada en el universo (H3). Eso implica que la distribución espacial de la materia es homogénea y que el espacio se expande por igual en todas las direcciones y en todos los puntos, aunque el ritmo de expansión puede variar con el tiempo.

La hipótesis H3 define la geometría local del universo. El problema es que hay diversas topologías —es decir, diferentes estructuras globales— compatibles con una geometría dada. El espacio podría ser infinito o plegarse sobre sí mismo y tener un volumen finito. Por ejemplo, en dos dimensiones, un plano infinito, un cilindro y un toro son espacios euclídeos con estructuras globales muy distintas. Esta propiedad no está determinada por las ecuaciones de la relatividad general, así que el modelo de la gran explosión supone que el espacio no tiene una estructura topológica complicada (H4).

Estas cuatro hipótesis afectan a la interpretación de cualquier observación que hagamos, ya que intervienen en la noción de distancia y a la hora de modelizar la propagación de la luz. Por ello, para pasar de una cosmología de precisión a una de exactitud, los investigadores han ideado maneras de poner a

ESCENARIO EXÓTICO

La burbuja de Hubble

En el escenario de la «burbuja de Hubble», la Vía Láctea se encontraría en una región menos densa que la media y con un radio de unos 130 millones de años luz. Eso podría introducir sesgos en la medición de las distancias y, por ejemplo, invalidar el cálculo de la constante de Hubble o incluso crear la ilusión de una expansión acelerada.

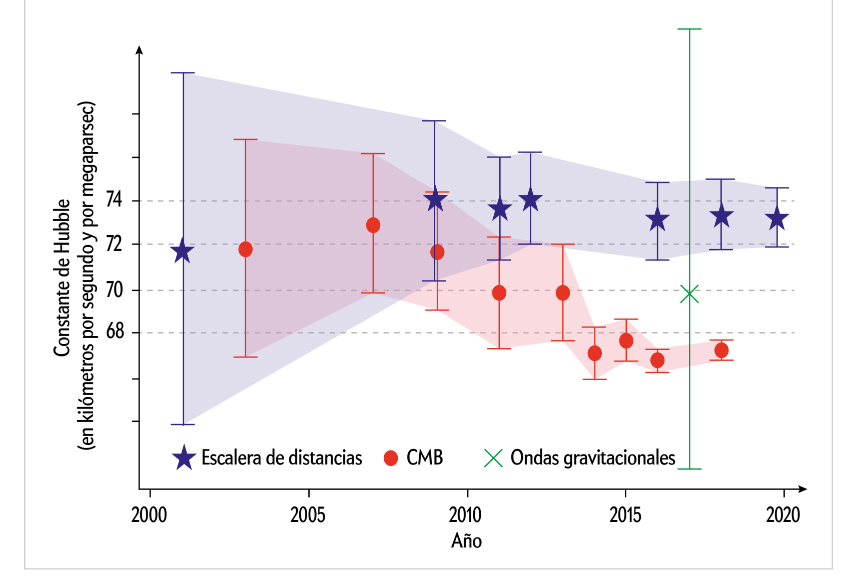
OBSERVACIONES INCOMPATIBLES

La «tensión de Hubble»

Para medir la constante de Hubble se han empleado diversos métodos. Uno consiste en construir una «escalera de distancias» a partir de objetos como las supernovas de tipo Ia y las estrellas variables cefeidas (*puntos azules en el gráfico*). Otro usa las diferencias que introducen las lentes gravitatorias en los tiempos de llegada de la luz emitida por una fuente lejana. Una tercera estrategia se basa en el análisis del fondo de radiación de microondas (CMB, *en rojo*). Con el tiempo ha ido aumentando la precisión de las medidas, que hoy son incompatibles, ya que sus barras de error no se solapan. Un nuevo método usa las ondas gravitacionales (*en verde*).

La tensión entre las distintas determinaciones de la constante de Hubble podría tener varios orígenes. No podemos descartar que alguno de los métodos esté afectado por un sesgo que aún no hayamos entendido. También hay que tener presente que el CMB explora el universo temprano, mientras que la escalera de distancias y las lentes gravitatorias dan información sobre tiempos más recientes. Eso significa que el cosmos local podría no ser representativo del universo a gran escala.

Aún existe otra posibilidad. Las observaciones de supernovas se basan en haces de luz muy delgados, que son sensibles a la estructura del espacio a escalas menores que las sujetas a la hipótesis de homogeneidad del modelo cosmológico estándar. En consecuencia, quizá no se pueda usar la misma geometría para interpretar los resultados del CMB y de las supernovas, lo que obligaría a reanalizar la forma de comparar estas observaciones. Como última opción, la tensión en torno a la constante de Hubble podría señalar la existencia de nueva física: se contempla el efecto de la energía oscura en el universo primordial, una posible interacción con la materia oscura o una modificación de la relatividad general. Los cosmólogos están examinando estas y otras ideas.



FUENTE: «THE CARNEGIE-CHICAGO HUBBLE PROGRAM. I. AN INDEPENDENT APPROACH TO THE EXTRAGALACTIC DISTANCE SCALE USING ONLY POPULATION II DISTANCE INDICATORS», RACHAEL L. BEATON ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 832, ART. 210, DICIEMBRE DE 2016.

prueba sus hipótesis. Veamos los principios en los que se basan algunas de sus propuestas.

Para empezar, la relatividad general se ha comprobado con gran precisión en el sistema solar. Esta teoría ha generado importantes predicciones conceptuales, como la expansión del universo o la existencia de los agujeros negros y las ondas gravitacionales, y todas se han verificado. No obstante, la teoría no está tan bien comprobada a escalas astrofísicas y en el régimen de pequeñas aceleraciones, que son precisamente las condiciones asociadas a la materia oscura y a la aceleración del universo.

Un primer método para poner a prueba la relatividad general consiste en examinar uno de sus elementos esenciales: el principio de equivalencia. Este establece que todos los cuerpos caen de la misma forma en un campo gravitatorio externo, independientemente de su masa o composición química. Desde 2017, el satélite Microscope, del Centro Nacional de Estudios Espaciales y la Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeroespaciales de Francia, ha comprobado este principio con una precisión del orden de 10^{-14}. Y los responsables de la misión aún esperan mejorar la sensibilidad en un orden de magnitud.

UN PRINCIPIO AL MICROSCOPIO

Es posible demostrar que el principio de equivalencia está íntimamente ligado al hecho de que las constantes de la naturaleza no varían ni en el tiempo ni en el espacio, algo que puede comprobarse fuera del sistema solar. Durante décadas, distintos equipos de investigación se han afanado por medir en diversos sistemas astrofísicos el valor de la constante de estructura fina, que caracteriza la intensidad de la interacción electromagnética. La nucleosíntesis primordial o los análisis realizados por el satélite Planck demuestran que esa constante no ha variado en más de una milésima a lo largo de la historia del universo. Los estudios de los espectros de absorción de los cuásares indican que no ha cambiado en más de 10^{-5} (en valor relativo) en los últimos 10.000 millones de años. Las investigaciones geofísicas restringen aún más esa variación relativa, hasta un máximo de 10^{-7} en los últimos 2000 millones de años. Y las comparaciones de relojes atómicos en laboratorios arrojan una evolución inferior a 10^{-17} al año.

La idea básica de la relatividad general es que la materia curva el espaciotiempo y que esa curvatura modifica las trayectorias tanto de los cuerpos materiales como de la luz. Por lo tanto, deberíamos observar una desviación de los rayos luminosos que pasan cerca de un astro muy masivo. Los británicos Arthur Eddington y Andrew Crommelin fueron los primeros en medir este efecto durante un eclipse total de sol en 1919. Verificaron que la deflexión de la luz que llegaba de una estrella lejana al pasar junto al Sol era compatible con el campo gravitatorio creado por nuestra estrella, cuya masa conocemos gracias a la dinámica de las órbitas planetarias. La medida de la desviación de la luz pone a prueba la coherencia entre distintos observables (en este caso, dos medidas de la masa del Sol), y un resultado discrepante indicaría el fallo de una de las hipótesis (la relatividad general). Por contra, una comprobación satisfactoria mejora el rango de validez de las hipótesis y teorías usadas para interpretar los datos, e impone limitaciones a cualquier escenario basado en supuestos diferentes.

En 2001, Francis Bernardeau, del Comisariado de la Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia, y yo propusimos generalizar ese test clásico de la relatividad general a escalas cosmológicas. En el año 2000, Yannick Mellier, del Instituto de Astrofísica de París, y su equipo habían detectado por primera vez unas pequeñas distorsiones en la forma de las galaxias. Este efecto de «lentes gravitatorias débiles» se debe a la acción gravitatoria de toda la materia presente a lo largo de la línea de visión del objeto observado sobre la luz que nos llega de él. Usando estas observaciones es posible determinar la distribución de la materia, que también se puede medir de forma independiente a partir de la distribución de las galaxias y de sus velocidades. Si comparamos los resultados de estos dos métodos, podemos poner a prueba la relatividad general. Esta es la estrategia que seguirá el satélite Euclides de la Agencia Espacial Europea, que se lanzará en 2022.

Los cosmólogos han concluido que casi una cuarta parte del contenido energético del universo corresponde a la materia oscura. Esta constatación ya indica que la hipótesis H2 es demasiado restrictiva, dado que el modelo estándar de la física de partículas no incluye la materia oscura. Por tanto, la cosmología aporta argumentos de peso a favor de la existencia de física más allá del modelo estándar, lo que sin duda es estimulante. Los físicos teóricos han concebido muchos candidatos susceptibles de constituir la materia oscura, por ejemplo las partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP, por sus siglas en inglés) en las teorías supersimétricas, o los axiones. Pero aún no se ha producido ninguna detección, y eso ha animado a algunos investigadores a explorar la idea de que la materia oscura no es más que la manifestación de un problema en la relatividad general. Así que estudian teorías de «gravedad modificada», las cuales deben satisfacer todas las restricciones observacionales existentes [*véase* «¿Es real la materia oscura?», por Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh; Investigación y Ciencia, octubre de 2018]. Aunque algunas de esas propuestas logran reproducir la dinámica de las galaxias, ninguna da cuenta de todas las observaciones cosmológicas.

Esa situación subraya el carácter inclusivo de la cosmología: todo avance en la comprensión de las interacciones y los constituyentes fundamentales de la materia debe incorporarse al modelo cosmológico. Por ello, cuando se descubrió que la masa de los neutrinos no era nula, los cosmólogos tuvieron que ajustar su descripción de la formación de las grandes estructuras del universo.

Al estudiar el cosmos debemos tener presentes ciertas particularidades. Para empezar, solo tenemos acceso a un universo y lo observamos desde un único punto, desde el aquí y el ahora. Estamos inmersos en la experiencia que tratamos de comprender y no tenemos otras con las que compararla. Y eso no es todo. Como la velocidad de la luz y la edad del universo son finitas, solo vemos una pequeña parte del cosmos: el «universo observable», formado por todos los objetos cuya luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros.

Así pues, ¿cómo podríamos comprobar la validez del principio copernicano, si no podemos cambiar nuestro punto de

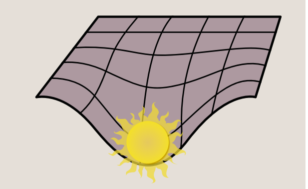
HIPÓTESIS

Las bases del modelo cosmológico estándar

El modelo de la gran explosión reposa sobre cuatro hipótesis principales de diversa índole. Las dos primeras, H1 y H2, atañen a teorías fundamentales de la naturaleza. La tercera, H3, se refiere a una clase de soluciones de esas teorías, y la cuarta, H4, a una propiedad de dichas soluciones. A estos supuestos hay que añadir la constante cosmológica y la materia oscura, cuya naturaleza aún se desconoce.

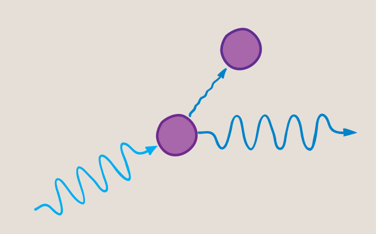
H1: RELATIVIDAD GENERAL

El modelo supone que la teoría de la relatividad general de Einstein describe la gravedad. Esta fuerza es una consecuencia de las deformaciones del espaciotiempo, que vienen determinadas por la materia y la energía presentes.



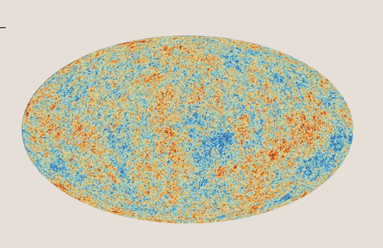
H2: MODELO ESTÁNDAR

Las interacciones no gravitatorias (electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil) de la materia están descritas por el modelo estándar de la física de partículas, basado en la teoría cuántica.



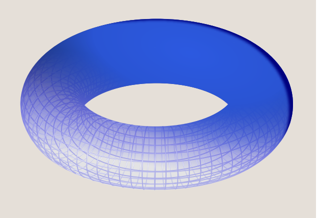
H3: PRINCIPIO COPERNICANO

Los cosmólogos asumen que el universo es homogéneo e isótropo a gran escala, y eso impone simetrías a las soluciones que describen el universo. Según este principio, no ocupamos un lugar especial en el cosmos, así que la parte que vemos es representativa del universo en su conjunto.



H4: TOPOLOGÍA TRIVIAL

Las hipótesis anteriores no determinan la estructura global del universo. Las observaciones indican que el espacio es localmente euclídeo (su curvatura es nula), pero hay diversas geometrías globales que cumplen esa condición, como un universo infinito o uno finito que se pliega sobre sí mismo a la manera de un toro. El modelo de la gran explosión supone que el universo no posee una estructura topológica complicada.



Poner a prueba el principio copernicano

Para construir el modelo de la gran explosión, los cosmólogos adoptaron el principio copernicano, que asume que no vivimos en un lugar privilegiado del cosmos. Cualquiera que sea su posición en el universo, un observador medirá, en promedio, las mismas propiedades. ¿Cómo verificar este principio si no podemos instalar un observatorio en otra galaxia?

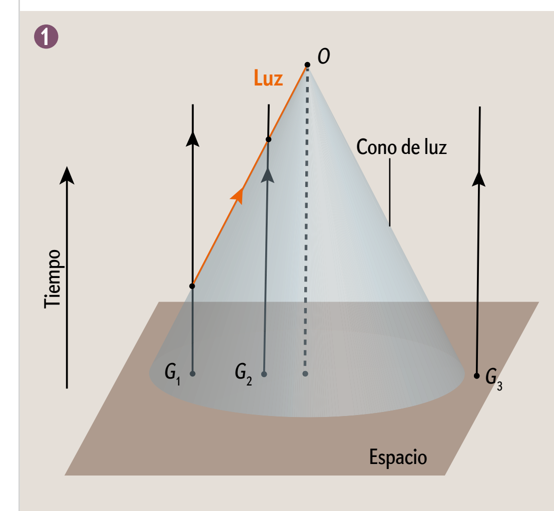
Hay varias posibilidades. Es necesario comprender que, en el vacío, la luz se propaga siempre a la misma velocidad. Un observador situado en el punto *O* de la figura 1 solo puede ver los objetos situados sobre su cono de luz (*en gris*). Cuanto más distante sea un astro, más tarda su luz en llegar hasta nosotros. Así pues, solo podemos ver una parte del cosmos, y lo que debemos determinar es si esa región es representativa del universo en su conjunto. Por otro lado, no tenemos acceso a las propiedades del universo fuera de nuestro cono de luz.

Debido a la expansión del espacio, el espectro de la luz emitida por una galaxia se desplaza hacia longitudes de onda más largas, un efecto que aumenta con la distancia a la galaxia. Este «desplazamiento al rojo» (*z*) es medible, lo que no es cierto, en general, para la distancia a la galaxia. Esta última magnitud puede deducirse a partir del desplazamiento al rojo y la ley de expansión cósmica, que depende del modelo cosmológico.

Si observamos el universo en dos momentos separados por diez años, tendremos acceso a dos conos de luz (*figura 2*). Durante el tiempo transcurrido entre ambas observaciones, el desplazamiento al rojo de las galaxias cambia ligeramente, y esa variación δz proporciona información sobre la estructura del espacio fuera del cono de luz. En principio, estudiando δz para distintos astros se podría verificar el principio copernicano, aprovechando que no estaríamos contemplando el universo desde el mismo punto de observación.

Otro test del principio copernicano se basa en el fondo cósmico de microondas (CMB). Esta radiación se propaga libremente desde que se emitió, 380.000 años después de la gran explosión, y la observamos en todas las direcciones, como si fuera una esfera a nuestro alrededor. El análisis del CMB permite comprobar la isotropía de su temperatura, aunque *a priori* eso no nos dice nada sobre el interior del universo observable. Sin embargo, hay un modo obtener esa información. Una ínfima parte de los fotones del CMB interactúan con el gas caliente de los cúmulos de galaxias que atraviesan (*figura 3*). Gracias a este «efecto de Sunyáev-Zeldóvich» (llamado así en honor a Rashid Sunyáev y Yákov Zeldóvich, los dos físicos rusos que lo propusieron) es posible reconstruir ciertas propiedades del CMB tal y como se vería desde esos cúmulos de galaxias, lo cual nos daría información sobre el interior de nuestro cono de luz.

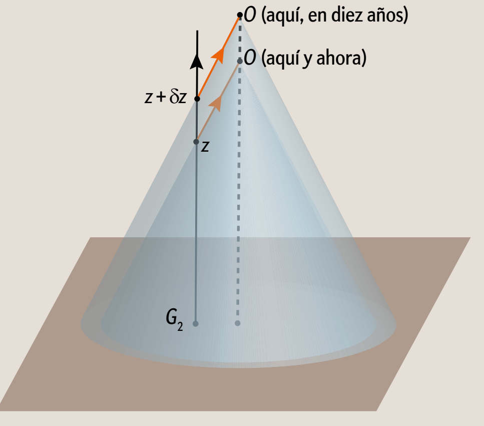
1



La velocidad de la luz es finita, y eso implica que, cuando observamos un objeto, lo vemos tal y como era en el momento en que se emitió la luz. Por lo tanto, estamos mirando al pasado. Si representamos el espacio en dos dimensiones y el tiempo en el eje vertical, el universo observable aparece como un cono. Dado que la galaxia G_2 está más cerca de nosotros que G_1, la vemos tal y como era en una época más reciente. La galaxia G_3 es más distante y su luz aún no ha tenido tiempo de alcanzarnos.

2

El cono de luz no deja de cambiar. El desplazamiento al rojo de un objeto en dos instantes distintos (por ejemplo, separados por diez años) pasa de *z* a *z* + δz. El estudio de esa variación nos da información sobre las condiciones locales que influyen en la expansión del universo. Comparando las variaciones para muchas galaxias sería posible verificar la homogeneidad e isotropía del universo.



3



El fondo de radiación de microondas (CMB) se emitió cuando el universo tenía 380.000 años. Hoy vemos la parte del CMB que se halla sobre nuestro cono de luz, pero no la que está fuera o dentro de él. En este último caso, los fotones del CMB pueden situarse sobre nuestro cono de luz si son dispersados por el gas de los cúmulos de galaxias que atraviesan. Así tendríamos acceso a información sobre las propiedades del CMB que se medirían desde dichos cúmulos.

observación? Este principio se consideraba inverificable, lo cual resultaba muy frustrante. En 2008, junto a mis colaboradores George Ellis y Chris Clarkson, de la Universidad de Ciudad del Cabo, analicé con más detalle algo que parecería obvio: vemos el universo «aquí y ahora», pero el «ahora» cambia a cada instante, por lo que el desplazamiento al rojo de cada galaxia debe variar de manera imperceptible con el tiempo.

Demostramos que combinando esas variaciones con otras medidas de la distancia es posible poner a prueba el principio copernicano. En los años sesenta, Alan Sandage y George McVittie habían calculado que, en efecto, el cambio del desplazamiento al rojo era muy pequeño, con un valor relativo del orden de 10^{-10} cada diez años para un objeto situado a 5000 millones de años luz. Un efecto de esa magnitud es casi imposible de medir, lo que por otra parte resulta tranquilizador, ya que garantiza la estabilidad de las mediciones de los espectros astrofísicos en escalas de tiempo de unos cuantos siglos. Pero con el desarrollo de la espectrografía de alta resolución, esas variaciones estarían al alcance del futuro Telescopio Extremadamente Grande (ELT, por sus siglas en inglés) y su espejo de 39 metros, que se está construyendo en Cerro Armazones, en el desierto chileno de Atacama [*véase* «El mayor ojo del planeta», por Xavier Barcons, Juan Carlos González Herrera y Agustín Sánchez Lavega; Investigación y Ciencia, octubre de 2019].

Casi al mismo tiempo se propuso otro método para comprobar el principio copernicano, basado en la observación de cúmulos de galaxias (*véase el recuadro* «Poner a prueba el principio copernicano»). Así, el progreso en las técnicas de observación permitirá obtener información sobre el universo «visto desde otro lugar», que es la clave para verificar el mencionado principio. Actualmente solo disponemos de confirmaciones indirectas de la hipótesis de la homogeneidad espacial, y habrá que esperar a que se implementen estas nuevas pruebas.

CUESTIONAR LA ISOTROPÍA

También está la hipótesis de la isotropía de la expansión cósmica. El análisis del mapa de temperaturas del CMB parece confirmarla, pero ¿hasta qué precisión es válida? En 2020, un equipo encabezado por Konstantinos Migkas, de la Universidad de Bonn, examinó la cuestión analizando un catálogo de 313 cúmulos de galaxias y empleando una relación fenomenológica entre su temperatura y su luminosidad. Concluyeron que el ritmo de expansión, y por lo tanto la constante de Hubble, del universo reciente podría variar en más de un 15 por ciento según la dirección. Este resultado aún debe confirmarse, y también habría que entender por qué tales anisotropías no habrían afectado a otros observables como el CMB.

El satélite Euclides será otra herramienta eficaz para evaluar desviaciones de la isotropía. Como demostré en 2015 junto a Cyril Pitrou, del Instituto de Astrofísica de París, y Thiago Pereira, de la Universidad Estatal de Londrina, debería ser posible detectar una anisotropía del orden del 1 por ciento mediante el análisis de las distorsiones gravitatorias. Desde un punto de vista teórico, esta anisotropía (de confirmarse) habría podido aparecer en una época reciente de la historia del universo. Podría estar asociada a la expansión acelerada y, en último término, a alguna propiedad de la energía oscura. De ser así, representaría un avance notable en la compresión de esta misteriosa componente.

Es necesario subrayar que los cosmólogos han planteado multitud de modelos que no descansan sobre la hipótesis H3: universos homogéneos pero anisótropos (su expansión no es igual en todas las direcciones) o heterogéneos (podrían tener un centro). Estos últimos permitirían cuantificar los efectos de las desviaciones de la homogeneidad y de la isotropía y, en consecuencia, evaluar la pertinencia de este supuesto.

No debemos olvidar que la homogeneidad e isotropía del universo no es evidente. La materia se agrupa en galaxias, y estas en cúmulos que forman filamentos alrededor de grandes espacios vacíos. El modelo cosmológico considera la geometría del universo promediando a una determinada escala, que no se especifica de manera explícita y es mucho mayor que la distancia típica entre galaxias.

En 2017, Pierre Fleury, de la Universidad Autónoma de Madrid, Julien Larena, de la Universidad de Ciudad del Cabo, y yo nos planteamos la difícil cuestión de si la geometría media del universo permite interpretar todas las observaciones con la precisión requerida. Como la geometría determina la propagación de la luz, habría que demostrar que las diferencias a pequeña escala entre la geometría «real» y la geometría media no introducen sesgos en el análisis de observaciones basadas en haces de luz delgados. Eso afectaría a las observaciones de objetos puntuales como las supernovas, pero no a las del CMB.

Por último, la estructura topológica (la hipótesis H4) se ha discutido profusamente en los últimos treinta años. Los datos del satélite Planck indican que el cosmos debe tener como mínimo el 96 por ciento del tamaño estimado para el universo observable. Más aún, se puede demostrar que un cosmos muy grande (al menos un 15 por ciento mayor que el universo observable), pero finito, sería indistinguible de uno infinito. Por cierto, no es posible probar mediante observaciones que el universo es infinito. Para examinar esa cuestión, solo podemos recurrir a argumentos teóricos.

La mayor parte de estas comprobaciones se llevarán a cabo en los próximos años, y será interesante evaluar la exactitud de las hipótesis actuales. Dadas las tensiones que están comenzando a surgir, tales pruebas quizá nos proporcionen un providencial hilo de Ariadna con el que alcanzar una mejor comprensión del origen de la aceleración cósmica y de la naturaleza de la energía oscura. Ese hilo también serviría para desarrollar o modificar el modelo cosmológico estándar, o para extender su rango de validez, confirmando así algunas de sus conclusiones. Todo esto también forma parte de un modelo vivo. IyC

PARA SABER MÁS

Más allá del Big Bang: Un breve recorrido por la historia del universo. Iván Agulló. Debate, 2020.

The cosmic revolutionary's handbook (or: How to beat the Big Bang). Luke A. Barnes y Geraint F. Lewis. Cambridge University Press, 2020.

Probing cosmic isotropy with a new X-ray galaxy cluster sample through the L_X–T scaling relation. Konstantinos Migkas et al. en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 636, art. A15, abril de 2020.

The accuracy of the Hubble constant measurement verified through Cepheid amplitudes. Adam G. Riess et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 896, art. L43, junio de 2020.

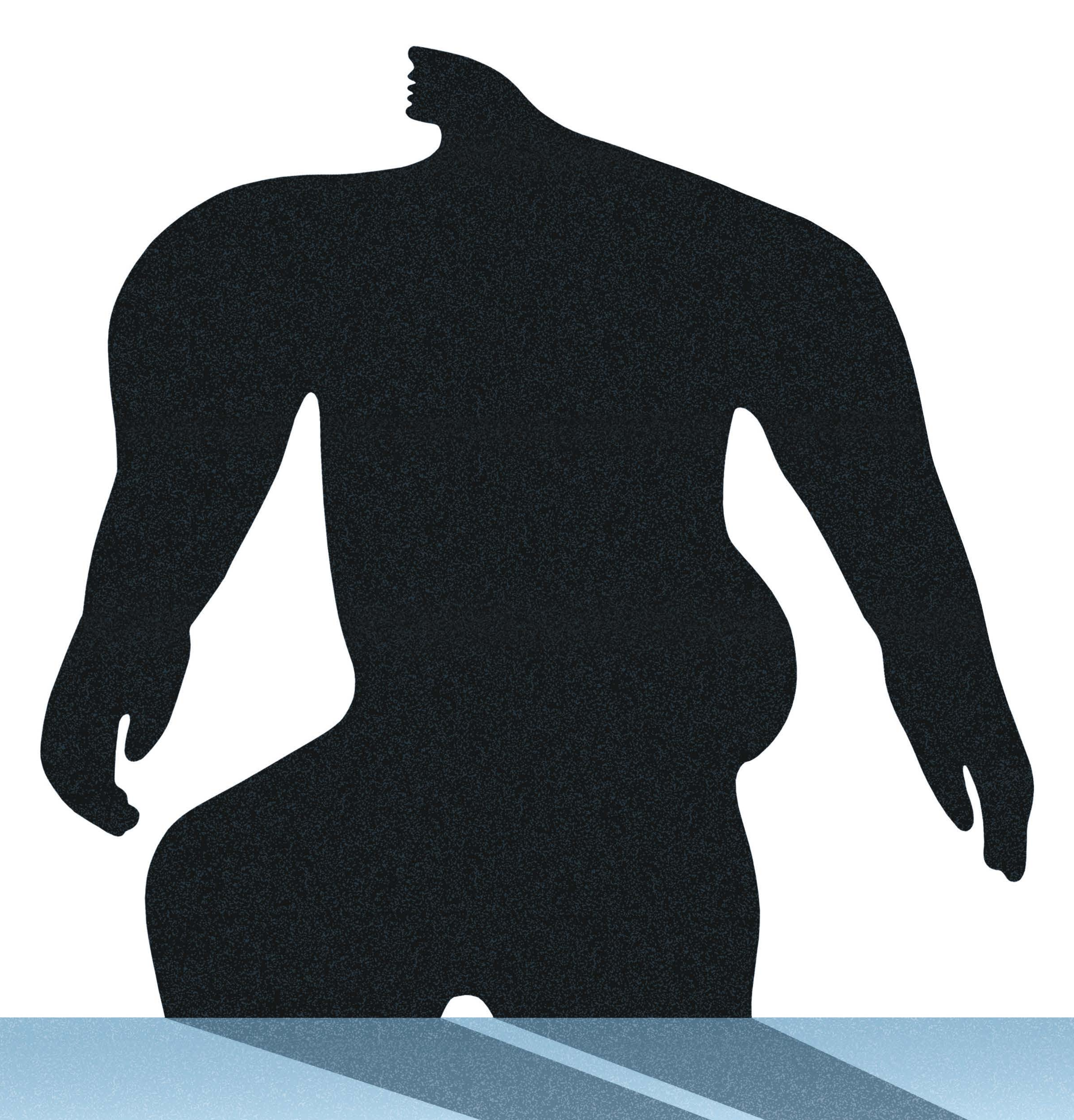
A new tension in the cosmological model from primordial deuterium? Cyril Pitrou et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 502, págs. 2474–2481, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El problema de la constante de Hubble. Dominik J. Schwarz en *IyC*, marzo de 2019.

La crisis en torno a la constante de Hubble. Richard Panek en *IyC*, mayo de 2020.

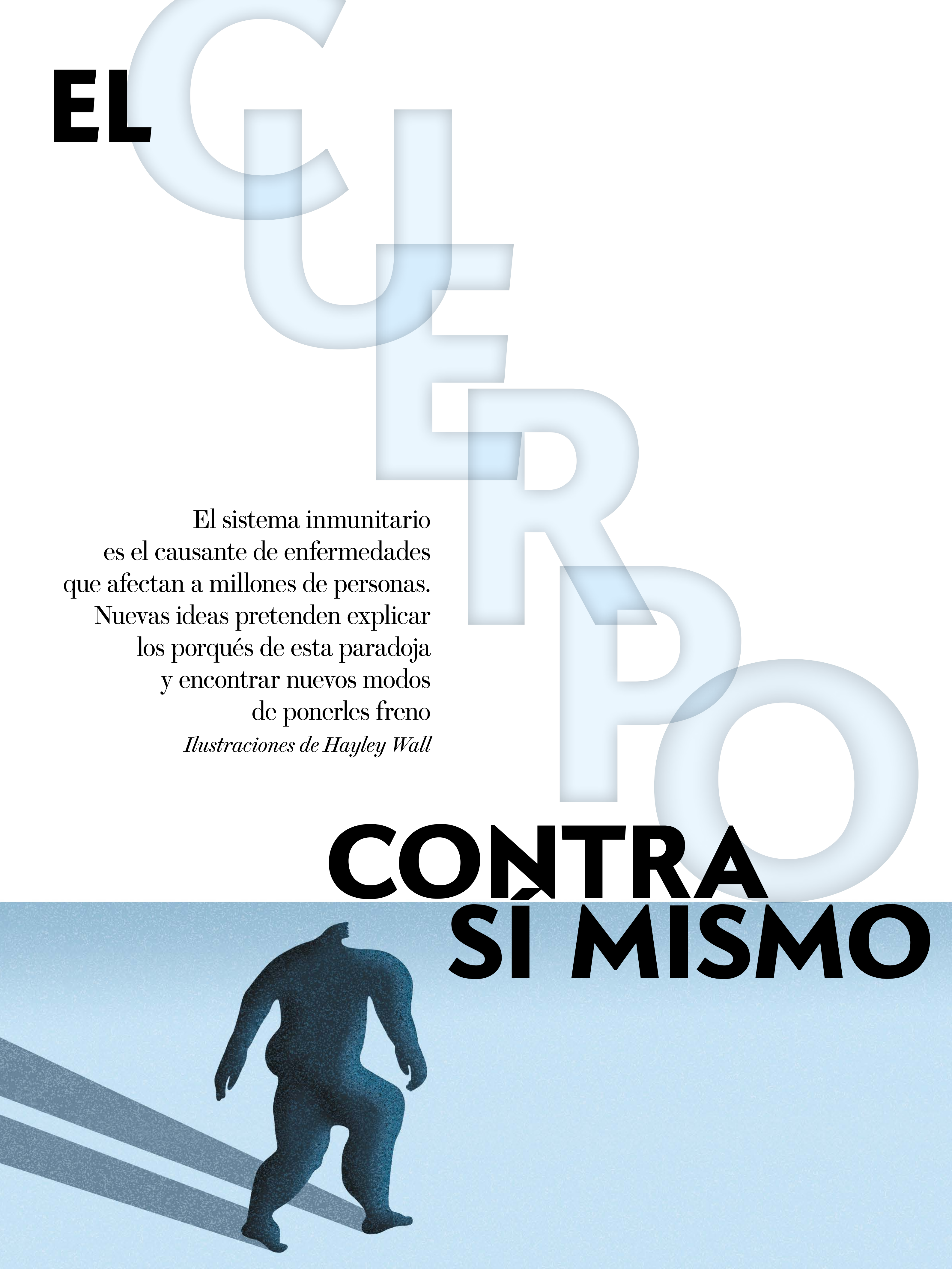
El problema de la constante cosmológica. Clara Moskowitz en *IyC*, abril de 2021.



EL CUERPO CONTRA SÍ MISMO

El sistema inmunitario es el causante de enfermedades que afectan a millones de personas. Nuevas ideas pretenden explicar los porqués de esta paradoja y encontrar nuevos modos de ponerles freno

Ilustraciones de Hayley Wall



TRAICIÓN DESDE EL INTERIOR

Síntomas debilitantes, análisis imprecisos, tratamientos ineficaces, médicos que no escuchan: el periplo de una mujer por el mundo de las enfermedades autoinmunitarias

Maria Konnikova

Annie, la hermana pequeña de mi amigo John, cayó enferma a los 11 años. Yo no era mucho mayor que ella, así que no entendí lo grave que era cuando mi amigo me dijo que padecía lupus. No fui consciente de que sus propias células la estaban atacando, unas veces en los riñones y otras en los pulmones. Su hermano me contó que se le había hinchado mucho la cara por la cantidad de pastillas que tenía que tomar. Eran corticoides, cuyos efectos secundarios le hacían caer gravemente enferma ante los catarros o las gripes que nosotros superábamos sin problemas. En ocasiones, Annie faltaba muchas semanas a clase. A veces sufría dolores espantosos. Al hacerse mayor se dedicó a la política local y al teatro infantil, una actividad que le encantaba. Pero nunca superó el lupus. Murió a los 49 años.

Demasiadas historias terminan así. El lupus es una enfermedad autoinmunitaria, en la que el guardián del cuerpo, el sistema inmunitario, se vuelve en contra de los órganos que en teoría debería proteger. Existe una ochentena de trastornos de esa naturaleza, más según algunas estimaciones, con casi 25 millones de enfermos solo en Estados Unidos, tal como indica la red de Institutos Nacionales de Salud del país. Y parece que las cifras van en alza. Abarcan desde dolencias conocidas, como la diabetes de tipo 1 o el lupus, hasta enfermedades minoritarias, como la arteritis de Takayasu, una peligrosa inflamación de los grandes vasos sanguíneos.

Este informe especial pone de relieve nuevos descubrimientos sobre tales afecciones, que con demasiada frecuencia no han sido estudiadas como se merecen, dadas sus graves consecuencias. A contracorriente del dogma médico imperante desde hace un siglo, están surgiendo nuevas ideas acerca de sus desencadenantes. Hoy los investigadores ya cuentan con teorías para explicar el enorme margen que separa ambos sexos: casi el 80 por ciento de las personas afectadas por una enfermedad autoinmunitaria son mujeres. Tales avances traerán consigo tratamientos mejores, gracias al conocimiento más minucioso del sistema inmunitario. El progreso es lento todavía, pero abre la esperanza a dejar atrás un pasado dominado por tratamientos y medicamentos ineficaces, que podían ser peores que la enfermedad misma.

—Josh Fischman

Recuerdo aquella mañana como si fuera hoy. Con palabras refinadas, yo la denomino «El día en que todo se fue a la mierda». Me estaba preparando para ir al gimnasio, algo que normalmente me da muchísima pereza, pero ese día me ilusionaba lucir los flamantes shorts que acababa de recibir por correo. Nada como estrenar conjunto deportivo para que a una le entren ganas de mover el esqueleto. Así que me los enfundé y, cuando estaba a punto de salir, sentí que me ardían los muslos. En cuestión de segundos se habían cubierto de unas ronchas enormes. Me quité la prenda y me metí corriendo en la ducha; era evidente que estaba contaminada con algo. Al cabo de un rato las ronchas menguaron. Una reacción alérgica, supuse. Devolví de inmediato los shorts y pensé que ahí acabaría todo.

Pero mi cuerpo no pensaba igual. A la mañana siguiente volvieron a aparecer. Las ronchas, no los shorts. Y esta vez, lejos de menguar, se extendieron. Días más tarde mi piel reaccionaba a todo lo que tocaba con una irritación cada vez mayor. Era como si en mi interior se hubiese desatado una malévola tormenta que nada podía aplacar.

No era mi primer episodio de reacciones cutáneas atípicas. A los 22 años me diagnosticaron mastocitosis. Me había salido una erupción supurante en forma de «J» alrededor del pecho izquierdo, tremendamente dolorosa. Mi dermatólogo, en cambio, estaba fascinado. Parece ser que este trastorno, por el cual el organismo fabrica demasiados mastocitos, un tipo de células inmunitarias que estimulan la inflamación, rara vez surge así en la edad adulta. Para empezar, afecta a menos de uno de cada 30.000 adultos, y normalmente las erupciones comienzan en la infancia. Tras confirmar el diagnóstico con una molesta biopsia, me pidió permiso para tomar unas fotos que enviaría a una revista médica. Dije que sí: me dolía demasiado para pensármelo, y el tipo estaba... encantado.



LA VIDA DE MARIA KONNIKOVA se vio trastocada por unas ronchas que cubrieron todo su cuerpo, una afección de tipo autoinmunitario.

FOTOGRAFÍA DE DEVIN YALKIN

El trastorno nunca me ha abandonado del todo. Cuando estoy agotada o estresada, o en ocasiones cuando me acaloro mucho, me vuelven a brotar unos habones dolorosos. A veces se me abren fisuras. Duran unas semanas y, de repente, como si nada, desaparecen durante un año, o dos o tres. No es una enfermedad autoinmunitaria, pero sin duda mi cuerpo no cesa de producir mastocitos en grandes cantidades. ¿Acaso serían esas dichosas células las que andaban desbocadas ahora y me habían cubierto de ronchas?

No era mastocitosis, dictaminó mi médico en una consulta urgente. Los niveles de triptasa, una enzima que liberan los mastocitos, eran normales. En cambio, la tiroides estaba tocada. ¿Qué era lo que tenía? ¿Tal vez la enfermedad de Graves-Basedow, un trastorno autoinmunitario que ataca a la glándula tiroides? ¿O quizá la tiroiditis de Hashimoto?, que viene a ser lo mismo pero con consecuencias opuestas: hipotiroidismo en vez de hipertiroidismo. Y en ese caso, ¿de dónde salían las ronchas? En la mayoría de los pacientes, las alteraciones de las hormonas tiroideas no provocan erupciones cutáneas.

El mundo de las enfermedades autoinmunitarias es lóbrego, plagado de suposiciones vagas. En conjunto son frecuentes pero, vistas una a una, muchas son minoritarias y nada fáciles de diagnosticar. Producen cuadros fastidiosamente ambiguos. El entumecimiento de las extremidades, por ejemplo, puede tener su causa en la esclerosis múltiple o en el lupus, ambas terribles pero distintas, con debilidad y dolores progresivos de por vida.

Después de mi cita de urgencia me hicieron un montón de pruebas. La tiroides no era la culpable. Pero los análisis tampoco revelaban nada más. Inicié una peregrinación que me llevó de las consultas de los internistas a las de los dermatólogos, y de estas a las de los alergólogos y los inmunólogos. Mi hermana, a la sazón médico, consiguió que me atendiera uno de los mejores especialistas en alergias del consorcio sanitario de la Universidad Harvard. El resultado: una plétora de siglas ininteligibles, que servían para descartar un trastorno tras otro. Una de ellas, el índice de urticaria crónica, señalaba que yo tenía «factores basófilos reactivos en [...] el suero, compatibles con un mecanismo etiopatogénico de base autoinmunitaria». Pregunté qué significaba todo eso y me contestaron que en resumidas cuentas... tenía ronchas.

Sin respuestas, las ronchas seguían invadiendo mi cuerpo. El cuello. La cara. Los párpados, tan hinchados que no podía abrirlos. Las dosis de corticoides orales que me pautaban eran cada vez más altas, además de antihistamínicos a gogó, que me dejaban tan sedada que apenas me tenía en pie. Las pomadas de corticoides eran cada vez más fuertes. Venían con unas advertencias larguísimas, que me instaban a no usarlas con prodigalidad ni durante demasiado tiempo, no fuera cosa que mi sistema inmunitario quedase del todo descompuesto. Engordé. O dormía demasiado o no pegaba ojo. Me costaba concentrarme. El sistema inmunitario estaba desarticulado y aun así la causa de las ronchas seguía siendo un misterio. Todos los especialistas insistían en que lo ocurrido con los shorts era pura coincidencia, pese a mi ferviente convicción de que debieron ser el detonante. En mi diagnóstico definitivo rezaba «idiopática»: de origen desconocido.

Al fin las ronchas remitieron. No gracias a ningún fármaco ni diagnóstico, sino al tiempo. Las ronchas idiopáticas pasaron a ser esporádicas y, una bendita mañana, un mero recuerdo. Pero un recuerdo sin causa conocida y sin cura. Uno que, hasta el día de hoy, puede resurgir en cualquier momento, con o sin estímulo provocador. Pero sin saber qué lo provoca, ¿cómo impedir que reaparezca?

Maria Konnikova es periodista científica y jugadora profesional de póquer. Es autora de los superventas *El gran farol* (Libros del Asteroide, 2021) y *¿Cómo pensar como Sherlock Holmes?* (Paidós Transiciones, 2013), entre otros títulos.



Autoinmunidad: «respuesta inmunitaria del organismo contra alguno de sus propios componentes». Esta es la definición que recoge el Diccionario de la lengua española. En suma, el organismo se ataca a sí mismo. En lugar de plantar cara a una agresión externa, las células arremeten contra sí. La mayoría de las veces no sabemos qué lo provoca. Tampoco conocemos una cura. En todo lo que envuelve la autoinmunidad, ignoramos mucho más de lo que conocemos.

Lo que sabemos es que existen cerca de 80 enfermedades autoinmunitarias. Casi cuatro de cada cinco afectados son mujeres. ¿Por qué? No estamos seguros. Pero he aquí otra cosa que sí sabemos: la investigación de la autoinmunidad está lastrada por una falta perenne de financiación. Quizá sea porque son las mujeres las más afectadas; históricamente el género femenino ha quedado desatendido en las investigaciones médicas. Quizá porque muchos de esos trastornos son muy poco frecuentes. O tal vez porque, cuando no se conoce una causa, a menudo se da por supuesto que es psicosomática. La persona misma es el origen y causa de su enfermedad. Se estresa demasiado. ¿No se lo estará inventando?

Esa es la acusación que recayó sobre mi hermana. En su último año de residencia como médico, empezó a sentir hormigueo y entumecimiento en las yemas de los dedos. Se pasó meses sin prestarles atención, hasta que empeoraron. Acudió al neurólogo, porque pueden ser síntomas premonitorios de la esclerosis múltiple. Y cuando la resonancia magnética no reveló nada, un médico le espetó que lo suyo eran invenciones, un producto de su imaginación. Cuando mi hermana pidió que le recetaran analgésicos porque los dolores neuromusculares se le hacían insufribles, no le hicieron caso.

Conviene recordar que es doctora, así que domina el vocabulario adecuado para describir con precisión lo que a otras personas quizá les cueste más expresar. Y lo que recibió a cambio es incredulidad: una respuesta de la medicina muy conocida para quienes sufren trastornos autoinmunitarios. Después de mucho insistir, consiguió que le hicieran una prueba de conducción nerviosa, cuyos resultados fueron notablemente anómalos. O sea, que ni mentía ni fingía. Padecía una polineuropatía desmielinizante inflamatoria (PNDI), una enfermedad minoritaria con componentes autoinmunitarios. Cursa con dolor, cansancio y, en pacientes como mi hermana, lesiones nerviosas permanentes. No quiero ni pensar qué habría sido de alguien sin los conocimientos profesionales ni los medios económicos de que dispone mi hermana.

El mundo de las enfermedades autoinmunitarias es duro. No es solo la incredulidad. Aunque tengas un diagnóstico confirmado, el tratamiento puede ser incierto. La etiqueta no garantiza la cura. Contra la PNDI no hay tratamientos específicos. Han pasado más de diez años y mi hermana sigue tratándose con un medicamento para la esclerosis múltiple, pues su dolencia no se estudia lo suficiente ni recibe financiación.

Con todo, ella tiene una etiqueta. A mí nunca me la pusieron. Pero he aquí lo que sé. Por muy visible o invisible que sea una afección, las enfermedades autoinmunitarias son reales, increí-

blemente dolorosas e increíblemente ignoradas por quienes no las padecen. Millones de personas son víctimas de esa falta de conciencia.

Y he aquí mi deseo. Que un día ya no me dé miedo estrenar una prenda, gracias a que alguien, en algún lugar, haya estudiado las causas de mi enfermedad. Que algún día mi hermana se cure. Que algún día se escuche a los incontables infelices a quienes les repiten que sus síntomas son imaginarios; y que, cuando así sea, existan los instrumentos para ayudarles. Somos personas cuyo cuerpo se autodestruye. Escuchemos de una vez. Apoyemos la investigación necesaria para dar la batalla.✦

PARA SABER MÁS

Portal sobre enfermedades raras y medicamentos huérfanos. https://www.orpha.net/consor/cgi-bin/index.php?lng=ES

Federación española de enfermedades raras. https://enfermedades-raras.org/

Sociedad Española Multidisciplinar de Enfermedades Autoinmunes Sistémicas. https://semais.es/

EN NUESTRO ARCHIVO

El médico detective. Brendan Borrell en *IyC*, septiembre de 2012.

La relevancia de las enfermedades raras. Francesc Palau en *IyC*, octubre de 2016.

Nuevos fármacos contra las enfermedades minoritarias. Lydia Denworth en *IyC*, octubre de 2020.

LAS ENFERMEDADES AUTOINMUNITARIAS, EN CIFRAS

Unos ochenta trastornos se consideran autoinmunitarios, aunque las definiciones y su número siguen sujetos a cambios

Texto de Maddie Bender

Gráficos de Jen Christiansen

Investigación de Miriam Quick

La idea de que los seres vivos pudieran atacarse a sí mismos por medio de un sistema inmunitario que evolucionó para defenderlos de las enfermedades del mundo exterior era absurda para el inmunólogo Paul Ehrlich. El futuro premio Nobel descartó por disparatada esa teoría en 1901, a la que calificó como «*horror autotoxicus*». Hoy en día, pacientes y médicos saben que las enfermedades autoinmunitarias son bien reales. Alrededor de 80 trastornos de ese tipo afectan a millones de personas en todo el mundo. La variedad y las cifras expuestas en el cuadro de las dos páginas siguientes son abrumadoras.

En la autoinmunidad intervienen tanto los autoanticuerpos, un conjunto de proteínas inmunitarias que marcan tejidos del propio cuerpo para que sean destruidos, como los linfocitos B y T, que actúan como ejecutores. Las modernas técnicas moleculares han mejorado su definición al dotar a los científicos de instrumentos con que rastrear esas poblaciones de células y de proteínas.

Aunque las líneas generales son ahora más claras que en la época de Ehrlich, los entresijos de diversas afecciones siguen suscitando controversia. Matthew C. Cook, director del Centro de Inmunología Personalizada de la Escuela de Investigaciones Médicas John Curtin, en Australia, señala que, incluso en enfermedades en las que no siempre se detectan autoanticuerpos vinculados al proceso patológico, la administración de medicamentos que modulan los linfocitos T culmina con éxito. Como ejemplo cabe citar la psoriasis, un trastorno cutáneo que suele clasificarse como autoinmunitario.

La lista mostrada aquí recoge la mayoría de las enfermedades conocidas en un campo científico en plena expansión. En ella se describe la prevalencia, la edad habitual de aparición y si es más probable que afecten a mujeres o a hombres, aunque casi siempre son las primeras.✦



Maddie Bender es escritora y creadora de podcasts sobre ciencia.

UN MUNDO DE AUTOINMUNIDAD

Las enfermedades autoinmunitarias son numerosas y, en conjunto, llegan a afectar al 4,5 por ciento de la población mundial. Esta lista de 76 trastornos proviene de un análisis minucioso publicado en 2012 por los inmunólogos Scott M. Hayter y Matthew C. Cook, entonces en la Universidad Nacional de Australia. Nuestra publicación la ha actualizado con información de otros especialistas en autoinmunidad y de la Asociación Estadounidense de Enfermedades Autoinmunitarias (AARDA). Las dolencias afectan a distintas partes del cuerpo, algunas a múltiples órganos. Son más frecuentes en las mujeres, aunque la distribución concreta entre los sexos difiere según el trastorno en cuestión. La edad media de aparición y la frecuencia en la población también varían.

Los inmunólogos y los reumatólogos admiten que la autoinmunidad es un terreno de investigación oscuro, en el que se siguen descubriendo las características que definen si un trastorno es autoinmunitario o no. En general, los aquí presentados se dividen en tres categorías, según el peso de las pruebas que apuntan a su origen en una respuesta autoinmunitaria o a la acción de autoanticuerpos. En los casos más evidentes, como en la enfermedad de Graves, el proceso obedece claramente a estos últimos, que desatan el ataque inmunitario, la inflamación y los síntomas debilitantes. En otros muchos, como en el síndrome de Guillain-Barré, no ha sido posible vincularlos con certeza a la patogenia pese a ser detectados con frecuencia. Por último, otros no siempre muestran autoanticuerpos, pero responden bien a los tratamientos que actúan contra el sistema inmunitario, lo que apunta a un componente autoinmunitario. La colitis ulcerosa y la psoriasis son ejemplos de este tipo.

En la lista no figuran ciertas afecciones donde se detectan autoanticuerpos y que parecen guardar relación con la autoinmunidad, bien porque no formaban parte del estudio de Cook y Hayter, no las recogía la AARDA o han sido cuestionadas por expertos a tenor de ciertas características biológicas. Los trastornos excluidos son: miocarditis, neuromielitis óptica, nefropatía membranosa primaria y púrpura trombocitopénica trombótica.

PRINCIPAL SISTEMA AFECTADO

Nervios y cerebro

Sistema endocrino

Más información en las páginas siguientes

Más información	TRASTORNO
31, 48, 49	Psoriasis‡
30	Tiroiditis autoinmunitaria de Hashimoto
39, 40, 49	Celiaquía
30, 40, 42	Enfermedad de Graves
37, 38, 40, 42, 46, 49–51	Artritis reumatoide‡
28, 34, 36–39, 42, 44, 45, 46, 49	Diabetes mellitus de tipo 1
—	Vitíligo
—	Fiebre reumática
—	Anemia perniciosa
49, 51	Alopecia *areata*
—	Púrpura trombocitopénica inmunitaria
30, 31, 37, 38, 40, 42, 43, 46, 49–51	Esclerosis múltiple
28, 30, 38, 40, 42, 43, 45, 46, 49, 51	Lupus eritematoso sistémico
—	Narcolepsia
50, 51	Colitis ulcerosa
—	Arteritis de la temporal
50	Enfermedad de Crohn
43	Esclerodermia
—	Síndrome antifosfolipídico
—	Hepatitis autoinmunitaria de tipo 1
—	Colangitis biliar primaria
43	Síndrome de Sjögren
—	Enfermedad de Addison
—	Dermatitis herpetiforme
—	Enfermedad de Kawasaki
—	Oftalmitis simpática
—	Uveítis anterior aguda con HLA-B27
—	Colangitis esclerosante primaria
—	Lupus eritematoso discoide
—	Poliarteritis nudosa
—	Síndrome CREST
43	Polimiositis/dermatomiositis
—	Miastenia grave
—	Enfermedad de Still
—	Granulomatosis con poliangitis

SEXO DEL PACIENTE
Porcentaje de mujeres*
0 50% 100%

EDAD MEDIA DE INICIO
Años†
0–9 20–29 40–49 60+

§

FRECUENCIA EN LA POBLACIÓN
Proporción aproximada de personas diagnosticadas (extrapolada de estudios regionales)

Más de 1 de cada 100

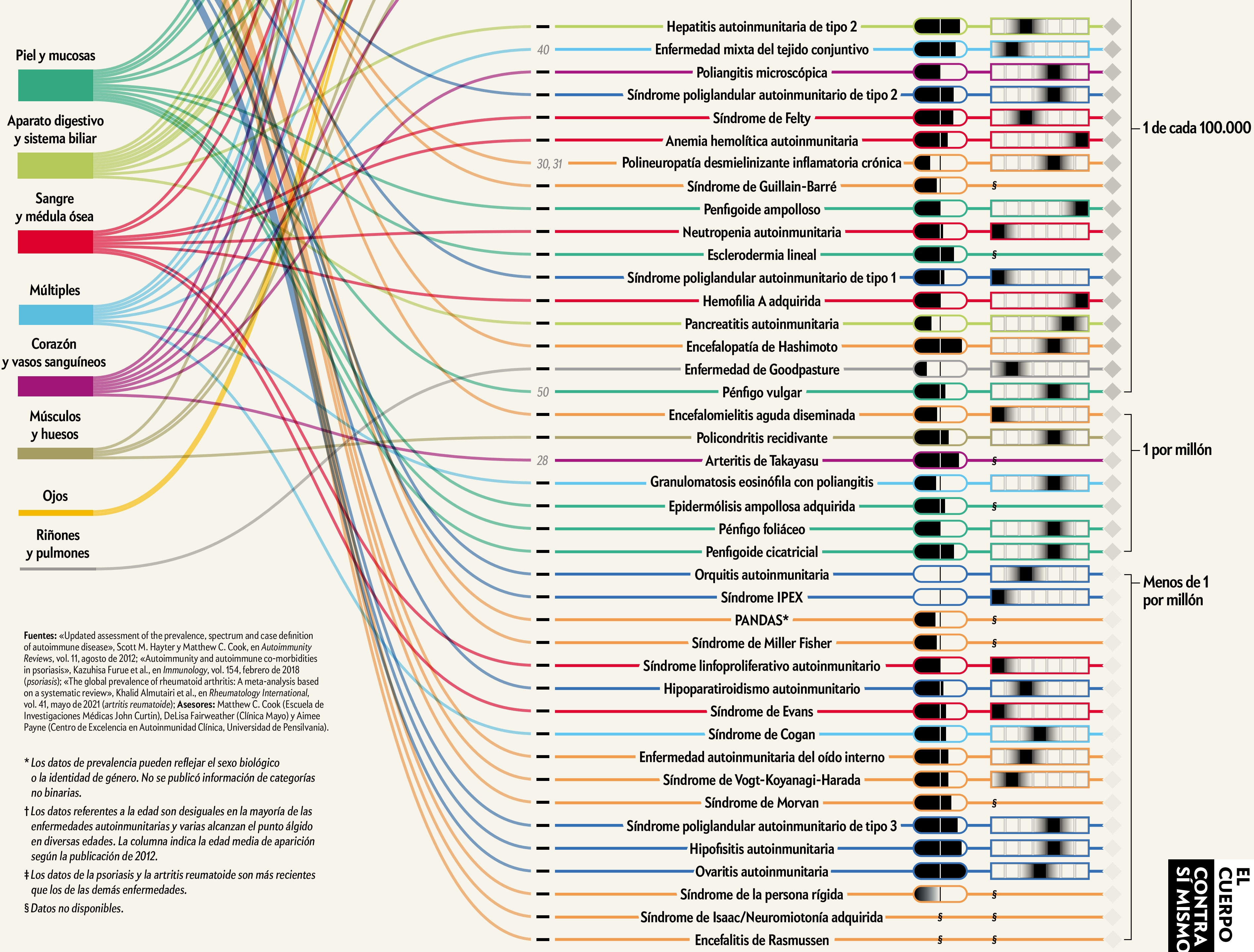
1 de cada 100

1 de cada 1000

Más frecuente

Menos frecuente

1 de cada 10.000



Fuentes: «Updated assessment of the prevalence, spectrum and case definition of autoimmune disease», Scott M. Hayter y Matthew C. Cook, en *Autoimmunity Reviews*, vol. 11, agosto de 2012; «Autoimmunity and autoimmune co-morbidities in psoriasis», Kazuhisa Furue et al., en *Immunology*, vol. 154, febrero de 2018 (*psoriasis*); «The global prevalence of rheumatoid arthritis: A meta-analysis based on a systematic review», Khalid Almutairi et al., en *Rheumatology International*, vol. 41, mayo de 2021 (*artritis reumatoide*); **Asesores:** Matthew C. Cook (Escuela de Investigaciones Médicas John Curtin), DeLisa Fairweather (Clínica Mayo) y Aimee Payne (Centro de Excelencia en Autoinmunidad Clínica, Universidad de Pensilvania).

* *Los datos de prevalencia pueden reflejar el sexo biológico o la identidad de género. No se publicó información de categorías no binarias.*

† *Los datos referentes a la edad son desiguales en la mayoría de las enfermedades autoinmunitarias y varias alcanzan el punto álgido en diversas edades. La columna indica la edad media de aparición según la publicación de 2012.*

‡ *Los datos de la psoriasis y la artritis reumatoide son más recientes que los de las demás enfermedades.*

§ *Datos no disponibles.*

CÓMO SURGE LA AUTOINMUNIDAD

Una nueva investigación indica que los órganos sometidos a estrés pueden atraer atacantes del sistema inmunitario

Stephani Sutherland



Cuando Decio Eizirik empezó a tratar a pacientes con diabetes de tipo 1 en la década de 1980 estaba convencido de que tras ella se ocultaba un sistema inmunitario descontrolado. Estas personas carecen de insulina porque el sistema inmunitario ataca y destruye las células β del páncreas, encargadas de fabricar esa hormona esencial. «Entonces se pensaba que si se pudiera controlar el sistema inmunitario, tal vez se lograría prevenir la diabetes», comenta este endocrinólogo, hoy investigador del Instituto de Investigación de Biociencias en Indiana y de la Universidad Libre de Bruselas.

El modelo clásico define el trastorno autoinmunitario como un ataque de células defensivas «rebeldes» contra otras células del organismo. Si bien el aporte suplementario de insulina mantenía con vida a las personas diabéticas, el problema estribaba en la agresión de las inocentes células β por el sistema inmunitario. «Se consideraba que las células β eran como el difunto en un funeral: es el centro de atención, pero no hace nada», recuerda Eizirik.

En cambio, ahora parece que no son tan inocentes y que el sistema inmunitario no es el culpable de todo. A lo largo de décadas, Eizirik y otros investigadores han llegado al convencimiento de que las células β son las desencadenantes



Stephani Sutherland es neurocientífica y periodista científica.

EN SÍNTESIS

La diabetes de tipo 1 surge a raíz de la destrucción de las células beta pancreáticas, productoras de la insulina, a manos del sistema inmunitario alterado.

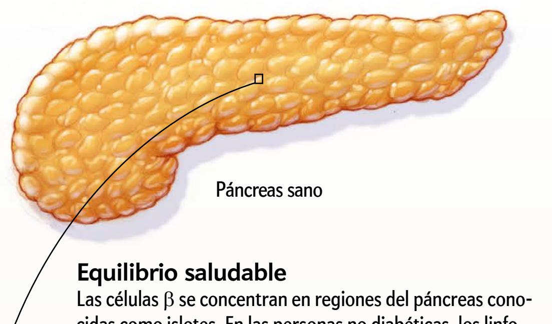
Hace años se creía que tales células eran simples víctimas, pero ahora parecen ser culpables, al menos en parte, de su propia destrucción.

Los desencadenantes de este y otros procesos autoinmunitarios parecen ser diversos, facilitados por la predisposición del individuo: la composición del microbioma, los virus o la exposición a sustancias tóxicas, serían algunos de ellos.



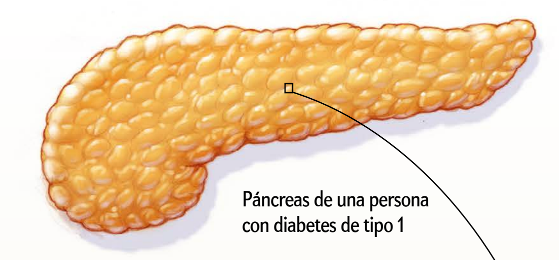
Blanco de la diabetes

Cuando el cuerpo no produce suficiente insulina aparece la diabetes de tipo 1. La carencia de esta hormona vital se debe a la muerte de sus productoras, las células β del páncreas. Mueren tras el ataque de los linfocitos T citotóxicos del propio sistema inmunitario. Durante años se pensó que en las personas con diabetes los linfocitos T adolecían de un defecto que los impulsaba contra las células β. Sin embargo, la sangre de las personas no diabéticas alberga el mismo tipo y la misma cantidad de linfocitos T (*en rosa*), sin que dañen a las células β. Por ello se sospecha que las propias células β atraerían a los linfocitos T con señuelos moleculares.



Equilibrio saludable

Las células β se concentran en regiones del páncreas conocidas como islotes. En las personas no diabéticas, los linfocitos T citotóxicos (o CD8+) que podrían dañar a las células β aparecen en el torrente sanguíneo. También se encuentran en grupos en el páncreas. Pero no atacan a las células β, por lo que pueden seguir produciendo insulina.



Diabetes de tipo 1

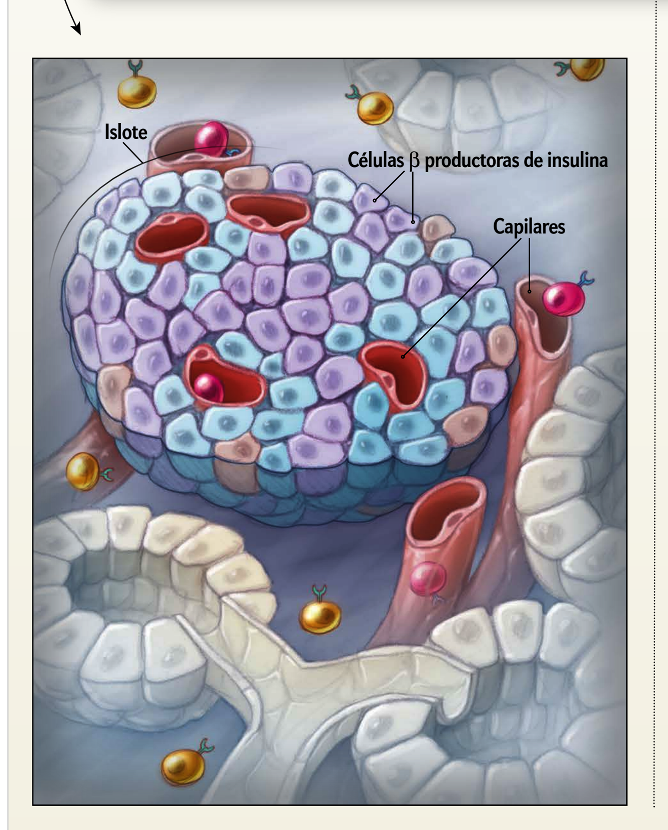
Los linfocitos T citotóxicos se acumulan en el páncreas antes de atacar. Los datos indican que, en los diabéticos, las células β producen gran cantidad de moléculas que sirven de objetivo a los linfocitos T. Una de ellas es la preproinsulina (PPI), precursora de la insulina. Otra es la que se conoce como proteína MHC de clase 1. Y en situación de estrés, las células β envían señales (quimiocinas) que atraen hacia ellas a las células inmunitarias.

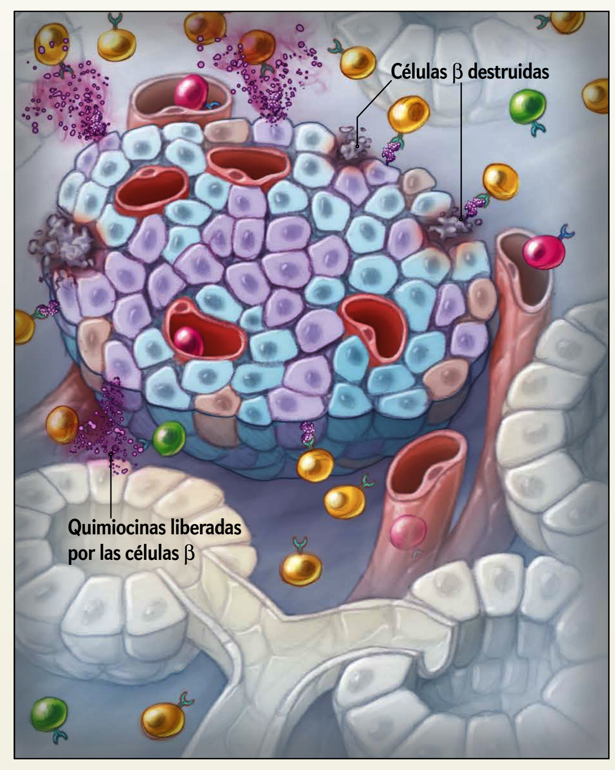
Linfocitos T CD8+ autorreactivos











FUENTE: «NEW INSIGHTS INTO THE ROLE OF AUTOREACTIVE CD8 T CELLS AND CYTOKINES IN HUMAN TYPE 1 DIABETES», DE CHRISTINE BENDER, SAKTHI RAJENDRAN Y MATTHIAS G. VON HERRAT, EN *FRONTIERS IN ENDOCRINOLOGY*, VOL. 11, 2021 (*referencia*); DAVID CHENEY (*ilustración*)

del mal. La forma en que lo hacen comenzó a conocerse a finales de los años noventa, cuando Eizirik midió los niveles de las señales químicas de las células pancreáticas. Según demostraron aquellos experimentos, en determinadas circunstancias, estas producen sus propias sustancias inflamatorias, que, a modo de llamaradas, atraen y desatan la furia de las células inmunitarias.

No está claro aún qué dispara esos destellos: pudiera ser una infección vírica o algún tipo de exposición nociva, pero este trabajo y los ensayos más recientes de varios científicos apuntan con claridad a la intervención activa de las células β. «Todo comienza en el tejido afectado», sostiene Sonia Sharma, inmunóloga del Instituto de Inmunología de La Jolla en California. «Sabemos que el tejido afectado no es un mero espectador, sino que participa en la inflamación dañina.»

La diabetes de tipo 1 es solo una más de las enfermedades autoinmunitarias, pero los datos dejan entrever que, en distintas dolencias, otros objetivos celulares también contribuyen a su propia destrucción. Recientes estudios genéticos indican que, en la artritis reumatoide y la esclerosis múltiple, las células afectadas portan genes hiperactivos que codifican proteínas ligadas a la enfermedad, y que las células inmunitarias se concentran en tales objetivos. Según explica Sharma, podrían mediar diez pasos entre el acontecimiento iniciador y el ataque final de las células inmunitarias contra el tejido afectado. «Hemos estado examinando el décimo paso, mientras que deberíamos mirar el primero, el segundo y el tercero. Se diría que hemos estado trabajando al revés», añade. Asegura que, si se desentrañaran los primeros pasos, se podrían lograr mejores tratamientos, curas o incluso medidas preventivas.

Es lógico que los investigadores se centraran de buen principio en el extremo del sistema inmunitario. Las enfermedades autoinmunitarias parecen «traiciones» de un sistema de defensa sumamente complejo que no solo evolucionó para protegernos de los patógenos invasores, sino también para vigilar a las células que amenazan con volverse cancerosas y eliminar los desechos celulares generados por las lesiones. Es el centinela que se interpone entre nosotros y el caos. Y sin duda, partes esenciales del mismo, en concreto los linfocitos B y T, desempeñan un papel fundamental en los trastornos autoinmunitarios. El tratamiento debe ir dirigido a dos objetivos: a esos glóbulos blancos y a sus lugares de actuación, asevera Eizirik. «El sistema inmunitario es tenaz y tiene una memoria de elefante. Una vez que los linfocitos T han aprendido a reconocer ciertas moléculas en las células diana, no cesan de atacarlas», advierte.

EJECUTORES DE LA AUTODESTRUCCIÓN

Gran parte de la investigación del último medio siglo ha girado en torno a un rasgo clásico de las enfermedades autoinmunitarias: los autoanticuerpos. Estas proteínas diminutas producidas por los linfocitos B se unen a otras llamadas antígenos que están presentes en los patógenos invasores, como bacterias y virus; así acoplados, los anticuerpos delatan a los intrusos para que sean destruidos. Sin embargo, los autoanticuerpos también se unen a los llamados autoantígenos, ubicados en la superficie de nuestras células. Allí actúan como balizas señalizadoras para unos agresores especializados, los linfocitos T citotóxicos. Estos son los verdaderos ejecutores, de ahí que los investigadores de la autoinmunidad busquen las parejas de linfocitos T y autoanticuerpos.

En fechas recientes se ha descubierto que, si bien los linfocitos T citotóxicos y los autoanticuerpos son indicadores de un problema autoinmunitario, su ubicación parece ser más importante que su mera presencia; la sangre de una persona sana puede contener ese tipo de linfocitos sin que enferme por ello. En 2018, el inmunólogo Roberto Mallone del INSERM en Francia y sus colaboradores publicaron un estudio donde se comparaban personas no diabéticas con diabéticos de tipo 1 y de tipo 2 (esta última no tiene un origen inmunitario; la insulina se produce, pero no funciona debidamente). Las concentraciones sanguíneas de linfocitos T citotóxicos eran muy similares en los tres grupos, incluso en las personas no diabéticas. A la vista de este parámetro, Mallone afirma que «todos tenemos autoinmunidad».

> **«Sabemos ahora que el tejido afectado no es un mero espectador, sino un participante.»**
> **Sonia Sharma,**
> ***Instituto de Inmunología de La Jolla***

No sucedía lo mismo en el páncreas, donde hallaron concentraciones sumamente altas de linfocitos T autorreactivos en los diabéticos de tipo 1. Como Eizirik antes que él, Mallone sospecha que no están ahí por casualidad, sino a causa del tejido enfermo, en definitiva, por las células β.

Otro motivo por el que se cree que las células afectadas son artífices destacadas en las enfermedades autoinmunitarias proviene de estudios genéticos, donde se ha demostrado que los genes que influyen en estas dolencias no solo se expresan en las células inmunitarias sino en las mismas células afectadas. A inicios de la década de los 2000, la secuenciación del genoma humano hizo posibles los estudios de asociación hologenómica, que revelaron muchos genes cuyas mutaciones agravaban el riesgo de trastornos autoinmunitarios. Y, como dice Sharma, tales genes aparecieron no solo en los linfocitos B o T, sino en otras células ajenas al sistema inmunitario. De hecho, estas últimas poseen genes que les permiten segregar citocinas y quimiocinas, mensajeros que desatan la respuesta inmunitaria, una actividad de suma importancia para la salud celular. Toda célula es susceptible de transformarse en cancerosa o de ser infectada. Si eso ocurre, ha de ser capaz de alertar al sistema inmunitario, explica Sharma. Pero ciertas mutaciones de esos genes disparan falsas alarmas en células que en realidad permanecen intactas.

El sistema inmunitario reaccionará como si la amenaza fuese real y caerá sobre ellas.

SIGNOS DE VULNERABILIDAD

Un estudio del grupo de Eizirik publicado el pasado enero en *Science Advances* aporta ejemplos de tales células engañosas en varias enfermedades autoinmunitarias. Examinaron la investigación publicada sobre la asociación hologenómica y vieron que más del 80 por ciento de las variantes genéticas identificadas se expresaban en las células afectadas por la diabetes de tipo 1 y otras tres enfermedades autoinmunitarias: la esclerosis múltiple, el lupus y la artritis reumatoide. No solo se constató que las células afectadas contienen genes vinculados con la enfermedad, sino también que producen más proteínas en el enfermo que en la persona sana. El equipo de Eizirik escrutó bases de datos genéticas creadas a partir de biopsias de personas con trastornos autoinmunitarios: células pancreáticas de diabéticos, tejido articular de pacientes con artritis reumatoide, células renales de enfermos de lupus e incluso muestras cerebrales de autopsias en casos de esclerosis múltiple.

Muchas células afectadas por la autoinmunidad comparten rasgos que las hacen sumamente vulnerables al ataque. Tienen al menos tres puntos débiles

El análisis mostró que gran número de genes candidatos eran extraordinariamente activos en los tejidos afectados y que muchos de esos segmentos activos de ADN aparecían en varias enfermedades, lo que apunta a vías comunes. Entre los genes con actividad adicional destacan los relacionados con los interferones, un tipo de citocinas proinflamatorias que las células segregan para avisar al sistema inmunitario de problemas, como una infección vírica.

Buena parte de las células afectadas en las enfermedades autoinmunitarias también comparten rasgos no genéticos que las hacen sumamente vulnerables al ataque. «Tienen al menos tres puntos débiles intrínsecos», refiere Mallone. En primer lugar, muchas se hallan en glándulas como el tiroides y el páncreas, donde «fabrican hormonas que secretan a gran velocidad, en un proceso que las somete a un gran estrés». Esa presión explica que una ligera sobrecarga pueda romper el equilibrio y alterar su funcionamiento y estructura, alertando al equipo de limpieza inmunitario. En segundo lugar, vierten directamente las hormonas y otros péptidos en el torrente sanguíneo, a través del cual viajan por todo el organismo, de modo que, como señas de identidad de esas células productoras, «son capaces de sensibilizar al sistema inmunitario a distancia», explica Mallone. El tercer punto débil radica en el abundante riego sanguíneo que reciben, lo que las hace muy accesibles. «Por eso, una vez que han sido sensibilizados, los glóbulos blancos llegan con gran facilidad [a los tejidos afectados]», concluye.

Además de esas vulnerabilidades, las células afectadas reaccionan a veces contra las amenazas externas de formas que provocan una intensa respuesta inmunitaria. Ante los daños causados por un virus, por ejemplo, algunas se autodestruyen y se quitan de en medio antes de que la infección se propague y sea necesaria la intervención del sistema inmunitario, pero la provisión de ciertas células afectadas por las enfermedades autoinmunitarias, como las neuronas y las células β, es limitada. Simplemente no cabe la opción de morir en masa por un virus, observa Eizirik. «Si mueren demasiadas, estamos perdidos.» Por tanto, permanecen vivas, pero el sistema inmunitario comienza a interpretar las moléculas que liberan como señales de que todas las células de su clase están en apuros. Y entonces sobreviene el ataque autoinmunitario.

La vasculitis supone un ejemplo sorprendente de la vulnerabilidad de las células afectadas que pone en marcha una respuesta inmunitaria. Esta afección de los vasos sanguíneos no es una enfermedad autoinmunitaria clásica, pues no depende de autoanticuerpos, sino que se trata de un trastorno autoinflamatorio en el que los mielocitos atacan otras células encargadas de formar las arterias, las venas y los capilares. En los niños se da una forma rara y agresiva como resultado de una mutación en el gen de la adenosina desaminasa 2 (*ADA2*). Esta enzima metabólica regula la actividad de las células tanto atacantes como atacadas, según un estudio de 2020 dirigido por Sharma y publicado en *Science Advances*. «Al perder esta enzima, todo el sistema se desregula», afirma. «El resultado es que las células afectadas comienzan a producir citocinas, con el consiguiente efecto por vecindad que activa a los mielocitos. Es decir, la afectada acaba siendo la causante de sus propios problemas.»

DETONANTES EXTERNOS

Pero ni siquiera las células con puntos débiles originan los trastornos autoinmunitarios por sí solas. No olvidemos las observaciones de Mallone en personas no diabéticas: los linfocitos T podrían haber atacado a las células β del páncreas, pero estas no lo permitieron. Algo inclina la balanza, inicia los acontecimientos en los tejidos afectados que parecen desencadenar la intervención inmunitaria. Muchos señalan como posibles detonantes una infección vírica pasajera o la exposición a sustancias tóxicas, que podrían preceder en años a la aparición y la detección del trastorno autoinmunitario.

Hace tiempo que se sospecha que el virus Coxsackie, un patógeno frecuente, es uno de los culpables de la diabetes de tipo 1. Por norma general causa un cuadro leve y transitorio con erupciones cutáneas y llagas en la boca. Pero en las circunstancias idóneas puede alcanzar al páncreas, señala Mallone: «Estos virus pueden infectar a las células β y si son cuantiosos llegan a destruirlas». En tal caso, la inflamación desatada atraería a más células inmunitarias al lugar donde las células β están muriendo. Y estas, en su agonía, liberarían autoantígenos característicos que sensibilizarían a las células inmunitarias cercanas que, a

su vez, acabarían atacando a otras células β, cuyas firmas antigénicas son similares.

Mallone asegura que esa combinación de elementos es crucial. «Se necesitan tres ingredientes básicos: autoantígeno, un entorno inflamatorio y predisposición a la autoinmunidad. Y estos elementos deben coincidir en el mismo lugar y momento. Esta es probablemente una de las razones por las que es tan difícil descubrir los desencadenantes ambientales: todos estamos expuestos, pero han de concurrir unas condiciones concretas.»

Esta visión está reemplazando a una idea anterior: que los virus desencadenan reacciones autoinmunitarias si las proteínas víricas se asemejan a los autoantígenos, lo que confunde a las células inmunitarias que atacan al propio organismo. El concepto de mimetismo vírico que sustentaba esta hipótesis comenzó a desmoronarse conforme se acumulaban datos de que tales sosias moleculares rara vez causan enfermedades pese a ser bastante frecuentes. Las moléculas humanas y las de los microbios infecciosos que guardan parecido entre sí se denominan reactivos cruzados. «La reactividad cruzada es muy común; se encuentra en todas partes», cuenta DeLisa Fairweather, inmunóloga de la Clínica Mayo en Jacksonville, Florida. «Si causase enfermedades, estas serían más frecuentes. No es la respuesta.» Así pues, ha ganado aceptación la idea de que cuando un virus destruye algunas células del tejido afectado, surge cierta inflamación y, en ese contexto, algunas células inmunitarias quedan sensibilizadas a las proteínas de las células moribundas.

EN ALZA

Otros irritantes externos, como los medicamentos y otras sustancias, pueden crear esas condiciones inflamatorias, lo que brinda más ocasiones para que los encuentros con los centinelas inmunitarios salgan mal. Algunos piensan que esos encuentros son los responsables del auge de las enfermedades autoinmunitarias durante las últimas décadas. En 2020, el reumatólogo Frederick Miller, del Instituto Estadounidense de Ciencias de la Salud Ambiental y sus colaboradores publicaron un análisis que rastreaba la prevalencia de los anticuerpos antinucleares, un grupo de autoanticuerpos que atacan a las proteínas del núcleo de la célula. El estudio siguió a más de 14.000 participantes en Estados Unidos durante 25 años. Entre 1988 y 1991, el 11 por ciento de los analizados eran portadores de los anticuerpos y esa cifra se mantuvo más o menos estable hasta 2004, con un pequeño ascenso hacia el final del período. Pero en 2012 los datos revelaron un acusado aumento de las personas portadoras, hasta casi el 16 por ciento. La escalada fue especialmente sorprendente en los adolescentes, asegura Miller, «que para mí fue lo más alarmante». Podría anunciar una próxima ola de enfermedades autoinmunitarias.

¿Qué ha cambiado para provocar el aumento? «Aún no lo sabemos», advierte Miller. Sin embargo, refiere toda una serie de posibles factores ambientales y conductuales: durante el tiempo que duró su estudio, dice, se autorizó el uso de unos 80.000 a 90.000 productos químicos nuevos. «Nuestra alimentación es completamente diferente», continúa. «El uso de la electrónica, práctico y útil como es, nos ha arrebatado horas de sueño.» Además, se ha agravado la contaminación del aire, del agua y de los alimentos. «En los últimos 30 años los cambios en nuestro modo de vida y nuestra exposición se cuentan por cientos», añade.

Otra idea algo paradójica es que el sistema inmunitario queda ahora mucho menos expuesto al mundo exterior y, en consecuencia, reacciona de forma exagerada ante las moléculas relativamente benignas que encuentra. La teoría está vinculada con la hipótesis de la higiene, presentada a inicios de los años 2000 y fundamentada en la modificación de las condiciones sanitarias. Este argumento guarda una estrecha relación con los cambios de las bacterias intestinales (microbioma) que traen aparejados los hábitos de la sociedad moderna. Una peculiaridad de la geopolítica ha brindado una oportunidad única para estudiar este efecto. Al acabar la Segunda Guerra Mundial, la región de Carelia quedó dividida entre Finlandia y Rusia. Los habitantes de esta remota región del noreste de Europa son genéticamente equiparables, pero la Carelia finlandesa se modernizó rápidamente después de la contienda, mientras que las condiciones de vida en la rural Carelia rusa permanecieron como hace 60 años. Es lógico pensar que la prosperidad debió reducir la incidencia de enfermedades, pero no ha sucedido así con las autoinmunitarias. De hecho, se ha observado lo contrario. La incidencia de la diabetes de tipo 1 en Finlandia es la más alta del mundo y unas seis veces mayor que en la Carelia rusa. Las incidencias de otros trastornos autoinmunitarios como la celiaquía también son de seis a diez veces más altas en la parte finlandesa.

Mikael Knip, de la Universidad de Helsinki, y su grupo creen que estas variaciones de la prevalencia pueden deberse a cambios en el microbioma de las poblaciones carelias. Nuestro ecosistema interno de bacterias intestinales se forma durante la infancia y está muy influenciado por el entorno. Para un estudio de 2016 publicado en *Cell*, el equipo de Knip recogió muestras fecales de bebés y niños de hasta tres años en ambos lados de la frontera ruso-filandesa. «Cuando analizamos los datos, vimos una clara diferencia entre los bebés de las Carelias finlandesa y rusa», apunta.

En los rusos predominaba una forma no patógena de la bacteria *Escherichia coli*. En cambio, los finlandeses acogían grandes concentraciones de *Bacteroides*, un género bacteriano que por lo común no desata reacciones inmunitarias intensas. «La exposición a diversos microbios ambientales influye en el entrenamiento del sistema inmunitario, sobre todo en el primer año de vida», explica Knip, y parece que los fineses no recibieron un adiestramiento riguroso. Su microbioma también carecía de la variedad observada en los rusos. Aunque Knip recalca que sería precipitado establecer una relación de causa-efecto entre la merma de la diversidad del microbioma en el lado finés y el aumento de los trastornos autoinmunitarios, sí cree que existe una conexión. «Convendría cambiar el nombre de la hipótesis de la higiene por el de hipótesis de la biodiversidad», opina.

Sharma coincide en que la biodiversidad intestinal es importante y en que la exposición a la variedad, por ejemplo la derivada de comer alimentos no procesados o, al menos, mucho menos procesados, es fundamental para entrenar el sistema inmunitario. «De esta forma, la flora intestinal es más abundante y diversa», afirma. Y concede al sistema inmunitario la posibilidad de acostumbrarse

a moléculas que no son de por sí peligrosas para que no reaccione de forma exagerada cuando se tope con ellas.

Con un enfoque distinto al adoptado en los estudios circunscritos a las células inmunitarias, a los tejidos afectados o al microbioma acabaremos entendiendo mejor las causas de las enfermedades autoinmunitarias y conseguiremos tratamientos mejores, opina Miller. Ello exige una visión holística. Al igual que en la antigua parábola india, «todo el mundo mira [la autoinmunidad] del mismo modo que aquellos ciegos que al tocar diferentes partes de un elefante describían cosas distintas, sin ser capaces de acertar con el todo». Ver el espectro inmunitario completo requerirá más estudios sobre distintos tipos de dinámica biomolecular, que tendrán que contar con grandes poblaciones de personas. Tal estrategia supondría millones de datos, pero «debemos abrazar la complejidad», concluye Miller. ✦

PARA SABER MÁS

Islet-reactive CD8+ T cell frequencies in the pancreas, but not in blood, distinguish type 1 diabetic patients from healthy donors. S. Culina et al. en *Science Immunology*, vol. 3, n.º 20, febrero de 2018.

Gene expression signatures of target tissues in type 1 diabetes, lupus erythematosus, multiple sclerosis, and rheumatoid arthritis. F. Szymczak et al. en *Science Advances*, vol. 7, n.º 2, enero de 2021.

Increasing prevalence of antinuclear antibodies in the united states. Gregg E. Dinse et al. en *Arthritis and Rheumatology*, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Inmunidad y diabetes. Relaciones delicadas. En *IyC*, septiembre de 1992.

Los caminos hacia la curación de la diabetes. Franz Martín, Eduard Montanya y Bernat Soria en *IyC*, enero de 2017.

RIESGO FEMENINO

Casi cuatro de cada cinco personas aquejadas por un trastorno autoinmunitario son mujeres. Entre los motivos se barajan las hormonas sexuales, los genes e incluso la flora intestinal

Melinda Wenner Moyer

EN SÍNTESIS

Que las enfermedades autoinmunitarias afectan mucho más a la mujer que al hombre se sabe desde hace décadas. Tres cuartas partes de los afectados son mujeres.

El segundo cromosoma X, propio del sexo femenino, las hormonas sexuales y la flora intestinal femenina parecen agravar el riesgo de autoinmunidad.

Los avances en el conocimiento del genoma y de los sistemas inmunitario y endocrino conseguidos mediante los estudios en seres humanos y animales abren al fin la puerta a nuevos tratamientos y enfoques preventivos.

Melanie See, vecina de Chapel Hill (Carolina del Norte), sufrió la primera andanada de síntomas extraños en 2005. De repente comenzó a sudar mucho. Perdió casi cinco kilos. Se mareaba al ir de la cama al sofá. Empezó a secretar leche sin haber lactado. Después de un sinfín de análisis le diagnosticaron la enfermedad de Graves-Basedow, un trastorno autoinmunitario que provoca hipertiroidismo. Tenía 45 años.

Tres años más tarde, cuando los síntomas permanecían controlados gracias a la medicación, su salud empeoró de nuevo. Adelgazó más. Estaba cansadísima. Le diagnosticaron celiaquía, otra enfermedad autoinmunitaria caracterizada por la intolerancia al gluten contenido en muchos alimentos. Luego, en 2015, la asaltaron unos desarreglos digestivos y dolores musculares terribles. Esta vez los médicos estaban perplejos. «Al principio me diagnosticaron de todo: vasculitis, lupus, ya ni me acuerdo qué más. En los análisis de sangre se veía que algo pasaba, al igual que en la biopsia muscular que me hicieron en junio de 2016, pero los resultados no encajaban con nada conocido», relata. Finalmente, el tercer diagnóstico fue enfermedad mixta del tejido conjuntivo, otro trastorno autoinmunitario muy poco frecuente que comparte rasgos con el lupus.

Las mujeres representan sorprendentemente cerca del 78 por ciento de las personas aquejadas por estas enfermedades, entre las que cabe citar, además de las que sufre Melanie, el lupus, la esclerosis múltiple, la artritis reumatoide y otros trastornos en que el sistema inmunitario ataca por error las células y los tejidos del organismo. Constituyen la quinta causa de muerte en las mujeres menores de 65 años.

Los motivos por los que la autoinmunidad afecta mucho más al género femenino hace tiempo que constituyen una incógnita que se empieza a esclarecer: las hormonas sexuales, el cromosoma X e incluso la flora bacteriana que coloniza nuestro interior, cuyo desarrollo difiere en ambos sexos, son algunas de las causas esgrimidas, a las que algunos entendidos suman la influencia de la evolución. Estos últimos plantean que la hipervigilancia inmunitaria podría haber conferido a la mujer una



ventaja reproductora que incrementaría las posibilidades de llevar a término el embarazo, a expensas de un riesgo más acusado de enfermar.

«Es importante comprender las profundas razones biológicas de estas diferencias sexuales», puntualiza Shannon Dunn, inmunóloga de la Universidad de Toronto. «Si conseguimos desentrañarlas, no solo se entenderá mejor cómo surgen las enfermedades autoinmunitarias y se diseñarán mejores tratamientos, sino que arrojaremos luz sobre las diferencias sexuales humanas en la respuesta a las infecciones, las vacunas, los traumatismos y el cáncer.»

Melinda Wenner Moyer
es redactora y colaboradora de *Scientific American*.



PATRONES HORMONALES

Las ostensibles disparidades en la autoinmunidad no son una observación reciente. Hace más de un siglo, cuando comenzaron a diagnosticarse estas afecciones, enseguida se vio que las mujeres eran mucho más propensas que los hombres. Pero por entonces los médicos concebían las enfermedades autoinmunitarias como entidades independientes, cada una con sus causas particulares. Nadie pensaba que pudiesen estar conectadas por mecanismos fundamentales y que pudieran afectar más a las mujeres por esos motivos biológicos comunes.

Todo cambió a principios de la década de 1990, cuando se descubrió que algunas enfermedades autoinmunitarias comparten mecanismos en común. Entre otros aspectos, que en la artritis reumatoide, la esclerosis múltiple y la diabetes de tipo 1 intervenían unos glóbulos blancos llamados linfocitos T cooperadores CD4+. Y en 1991, una enferma de lupus llamada Virginia Ladd fundó la Asociación Estadounidense de Enfermedades Autoinmunitarias (AARDA) tras averiguar que varios familiares estaban afectados, de lo cual se deducía una herencia genética común.

Al pensar en las enfermedades autoinmunitarias como en un conjunto, se advirtieron coincidencias interesantes. Por un lado, algunas aparecen después de las grandes transiciones vitales que experimenta la mujer. (Casi todas las investigaciones se han realizado con mujeres cisgénero.) Por ejemplo, el lupus y la esclerosis múltiple suelen surgir durante los años fértiles, mientras que otras, como la artritis reumatoide, tienden a hacerlo después de la menopausia. También durante el embarazo puede haber alteraciones autoinmunitarias: los síntomas de la artritis reumatoide, la esclerosis múltiple y la enfermedad de Graves acostumbran a mitigarse, en tanto que los del lupus empeoran.

¿Qué tienen en común esas transformaciones: la pubertad, el embarazo y la menopausia? Todas implican notables cambios hormonales que protagonizan los estrógenos, la progesterona y la testosterona. Los primeros aumentan durante la pubertad y el embarazo. Ahora está bastante claro que, con excepciones, muchas enfermedades autoinmunitarias tienen una «base estrogénica», asegura DeLisa Fairweather, microbióloga e inmunóloga en la clínica Mayo de Jacksonville, Florida. De hecho, tanto los anticonceptivos orales como las hormonoterapias sustitutivas, que suplen la escasez de estrógenos, se han asociado con un mayor riesgo de lupus.

A semejanza de las demás hormonas sexuales, los estrógenos modifican la expresión de varios genes involucrados en la inmunidad. Por ejemplo, activan el gen del interferón γ, sustancia que articula la respuesta inmunitaria contra los patógenos pero que también puede intensificar las respuestas autoinmunitarias. También activan los linfocitos B, productores de los anticuerpos, proteínas que marcan y atacan las sustancias exógenas, una parte de los cuales, los autoanticuerpos, arremeten contra las células del propio organismo.

Las hormonas con funciones importantes en la gestación, como la progesterona, también destacan por sus notables efectos inmunitarios. Numerosos glóbulos blancos como los linfocitos T y los macrófagos poseen receptores de progesterona en su superficie. Cuando la progesterona se fija a esos receptores, activa un tipo de respuesta defensiva que favorece la producción de anticuerpos y autoanticuerpos, conocida como respuesta inmunitaria Th2, por los linfocitos T cooperadores (en inglés, *helpers*) de tipo 2. Difiere de la respuesta Th1, en la que no se fabrican tantos anticuerpos y entran en acción glóbulos blancos que atacan directamente a otras células.

El aumento de la progesterona podría explicar por qué se suavizan los síntomas de la artritis reumatoide y la esclerosis múltiple durante el embarazo, pues son enfermedades mediadas por respuestas de tipo Th1, no Th2, así que la modificación inducida por la progesterona reduciría la carga inmunitaria. Con todo, «las mujeres con esclerosis múltiple corren un riesgo muy acusado de sufrir un brote después del parto, lo cual tiene que ver con la bajada drástica de las hormonas sexuales», recalca Tanuja Chitnis, neuróloga del hospital Brigham and Women's de Boston.

Otra hormona de gran importancia en la autoinmunidad por sus propiedades inmunodepresoras es la testosterona, que también produce el cuerpo femenino, si bien menos que el masculino. Los linfocitos B y T disponen de receptores para la testosterona y esta reduce la respuesta de las células inmunitarias, entre ellas las de los neutrófilos, los linfocitos citolíticos naturales (NK) y los macrófagos; este podría ser uno de los motivos por los que la incidencia de las enfermedades autoinmunitarias es más baja en los varones. Se ha observado que los hombres con esclerosis múltiple suelen tener niveles bajos de testosterona; asimismo, los varones con déficit de testosterona por hipogonadismo corren más riesgo de sufrir lupus y artritis reumatoide.

Las hormonas sexuales también modulan la expresión de algunos genes. Un consorcio científico fino-alemán descubrió en 1999 un gen que desempeña una función crucial en la autoinmunidad, al que denominaron *AIRE* (de *autoimmune regulator*). Expresado en las células del timo, un órgano donde se fabrican linfocitos T, dicho gen garantiza que estos queden expuestos a una serie de proteínas durante su desarrollo, una especie de entrenamiento cuyo

objetivo es que reconozcan esas proteínas como amigas, no como enemigas. También gracias a *AIRE*, aquellos linfocitos T que atacan a las proteínas amigas son destruidos en el timo antes de que migren al resto del cuerpo, donde podrían causar daños.

No es sorprendente, pues, que las personas que carecen del gen *AIRE* o que presentan alguna mutación en él sean más propensas a sufrir enfermedades autoinmunitarias. Su organismo no elimina los linfocitos T que deberían serlo, por lo que acaban «diseminados por el cuerpo y desatando un trastorno autoinmunitario», explica Dunn.

Curiosamente, la actividad de *AIRE*, al igual que la de otros genes análogos, está controlada en cierta medida por las hormonas sexuales. En un estudio realizado en 2016 con ratones, un equipo de la parisina Universidad de la Sorbona descubrió que los estrógenos y la progesterona reducen la expresión del *AIRE*, de modo que se sintetiza menos cantidad de la proteína codificada, mientras que la testosterona hace que se fabrique más. Los autores también comprobaron que, después de la pubertad, las mujeres tienden a producir menos proteína AIRE que los hombres, quizá por la influencia de las hormonas sexuales. Si hay menos AIRE, más linfocitos T autorreactivos pueden escapar del timo y provocar enfermedades autoinmunitarias.

Con todo, a pesar de su influencia, las hormonas sexuales no lo explican todo. Las enfermedades autoinmunitarias como el lupus y la esclerosis múltiple a veces surgen en la niñez, antes de que se disparen los niveles de hormonas como los estrógenos o la progesterona. Esto quiere decir que seguramente intervienen otros procesos. En su búsqueda, algunos están estudiando una diferencia elemental entre los hombres y las mujeres que surge mucho antes del nacimiento: el segundo cromosoma X.

LO QUE OCULTA EL CROMOSOMA X

El dogma biológico sostiene que la mujer tiene dos cromosomas X en todas las células, pero uno queda desactivado desde las primeras fases del desarrollo embrionario. Ese cromosoma X suplementario se convierte en una masa amorfa y oscura que pervive en silencio en todas las estirpes celulares. La inactivación garantiza que no se expresen más genes ligados al cromosoma X de lo que es preciso. Pero en los últimos años se ha descubierto que las cosas no son del todo así. Los estudios indican que permanecen activos al menos el 15 por ciento de los genes albergados en el cromosoma X supuestamente inactivo. A grandes rasgos, eso significa que el organismo femenino produce el doble de las proteínas codificadas por esos genes. En las enfermas de lupus, por ejemplo, algunos genes permanecen activos en las dos copias del cromosoma X, lo cual se correlaciona con la severidad de la enfermedad: las que sufren cuadros más graves tienen más genes activos que las aquejadas por formas más leves.

Y es que, en efecto, numerosos genes del cromosoma X se han vinculado con las enfermedades autoinmunitarias. Uno es el gen del receptor de tipo toll 7 (*TLR-7*), una proteína que se ha vinculado con trastornos autoinmunitarios como el lupus, la polimiositis, la esclerodermia y el síndrome de Sjögren. El TLR-7 tiene por misión reconocer los patógenos y alertar a otras células de su presencia; también refuerza la producción de los interferones, unos intermediarios inflamatorios capaces de intensificar la respuesta autoinmunitaria. Otro gen que se halla activado en el cromosoma X supuestamente inactivo de la mujer es *TASL*, que también incrementa la producción de interferones, hasta el punto de que la mujer tiene el doble de la correspondiente proteína, dice Hal Scofield, médico del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Oklahoma, que estudia la inactivación del cromosoma X en las enfermedades autoinmunitarias.

Hace poco se ha descubierto un aspecto curioso acerca de la inactivación del cromosoma X que respalda su relación con la autoinmunidad. En la mujer, la copia inactiva se mantiene en una conformación harto inusual dentro de los linfocitos B y T. En 2019, el equipo de Montserrat Anguera, especialista en ciencias biomédicas de la Universidad de Pensilvania, observó que, en las ratonas, cuando las células inmunitarias maduran, los mecanismos de inactivación del segundo cromosoma X sufren alteraciones dinámicas que facilitan la activación de sus genes aun cuando deberían permanecer inactivos. «Nos quedamos patidifusos», confiesa Anguera.

Nadie creía que la inactivación del cromosoma X fuese distinta en las células inmunitarias femeninas, pero resulta ser que sí, y esas diferencias podrían condicionar el riesgo de autoinmunidad. En junio de 2021, el equipo de Anguera observó que los linfocitos B de las niñas y las mujeres aquejadas de lupus evaden los mecanismos celulares normales de inactivación, con lo cual probablemente sinteticen mayores cantidades de las proteínas codificadas en ese cromosoma.

Las alteraciones numéricas o aneuploidías del cromosoma X también ponen de manifiesto su importancia en la autoinmunidad. Los hombres con síndrome de Klinefelter, por ejemplo, poseen dos cromosomas X junto con un cromosoma Y, y son 14 veces más propensos a padecer lupus que los demás. De la misma manera, las mujeres con trisomía X, dotadas de tres cromosomas X, son 2,5 y 2,9 veces más propensas que las demás a sufrir lupus y síndrome de Sjögren.

¿Por qué presentan las mujeres esos mecanismos extraños que agravan el riesgo de enfermar? Lo normal es que, con el tiempo, la evolución deseche los procesos que dificultan la reproducción y el desarrollo, y la autoinmunidad vinculada al cromosoma X sin duda lo es. Esta paradoja hace pensar a los biólogos que el fenómeno quizá reporte alguna ventaja evolutiva.

En un artículo publicado en *Trends in Genetics* en 2019, el equipo dirigido por Melissa Wilson, especialista en biología computacional y evolutiva de la Universidad Estatal de Arizona, expuso su hipótesis de la compensación gestacional, fundamentada en observaciones sobre la evolución. La placenta, el órgano que suministra oxígeno y nutrientes al feto, surgió en los mamíferos al mismo tiempo que los cromosomas sexuales, coincidiendo también con la repentina adición de gran cantidad de genes nuevos al cromosoma X. Las tres innovaciones podrían estar relacionadas.

Durante el embarazo, la madre tiene que tolerar al feto, la mitad de cuyo ADN es extraño, pues procede del padre. En circunstancias normales, el sistema inmunitario rechazaría cualquier célula foránea. También tiene que tolerar la placenta, que se forma a partir del embrión.

Es posible, argumenta Wilson, que los genes vinculados al cromosoma X y la inactivación incompleta del mismo evolucionasen para que el organismo femenino reaccione con mayor tolerancia a los requisitos inmunitarios impuestos por el embarazo. Durante la gestación, la inmunidad fluctúa de forma dinámica: al principio aumentan las respuestas inmunitarias sanas, lo cual favorece el crecimiento de los vasos sanguíneos en la placenta; hacia la mitad, la inmunidad decae. Por último, vuelven a incrementarse las respuestas inmunitarias y la inflamación, como preludio del parto.

Otras observaciones concuerdan con la teoría de la compensación gestacional. Por ejemplo, el tiempo que pasan embarazadas las mujeres de hoy en día con respecto a la esperanza de vida es mucho menor que hace siglos, de forma que su inmunidad no queda inhibida por la gestación con la misma frecuencia de antaño. Ello explicaría la creciente incidencia de las enfermedades autoinmunitarias en las mujeres actuales y su menor prevalencia en el pasado. Aunque hará falta investigar mucho más para corroborar esta hipótesis, Wilson afirma que «es posible que la placentación y el embarazo sean fundamentales en la configuración del sistema inmunitario materno, lo cual, a su vez, podría explicar esas diferencias entre sexos en la incidencia de las enfermedades». Dicho de otro modo, la autoinmunidad sería una consecuencia desafortunada de la compleja respuesta inmunitaria que necesita la mujer para poder gestar.

DESENTRAÑAR EL MISTERIO

No todos los fenómenos biológicos vienen determinados por la genética, ni muchísimo menos. Un gemelo puede contraer una enfermedad autoinmunitaria y el otro no, pese a compartir idéntico genoma. El ambiente es una pieza importante del rompecabezas. Todavía no está claro cuáles son las exposiciones más influyentes, pero las investigaciones apuntan a las infecciones bacterianas, las sustancias como los perturbadores endocrinos, el tabaquismo, la alimentación, el estrés y las bacterias comensales «buenas» que colonizan el intestino.

Hay estudios fascinantes en animales que delatan a esas bacterias, en conjunto integrantes de la microbiota o flora intestinal, como instigadoras de las enfermedades autoinmunitarias. Jayne Danska, inmunóloga y biofísica de la Universidad de Toronto, ha dedicado gran parte de su trayectoria a estudiar la relación entre el sexo y la genética de las enfermedades autoinmunitarias: básicamente, a averiguar si los genes predisponentes tienen efectos dispares en la mujer y en el hombre. En el 2012, un descubrimiento casual relanzó su trabajo en una dirección inesperada. «En ciencia suele decirse que uno encuentra lo mejor cuando no lo anda buscando», ironiza.

El equipo de Danska buscaba genes que predispusieran a la diabetes de tipo 1, una enfermedad autoinmunitaria que causa la destrucción de las células β productoras de la insulina, en el páncreas. Con ese fin usaban roedores criados en el laboratorio, conocidos como «ratones diabéticos no obesos» (DNO). Los ratones sirven bien como modelo de las enfermedades humanas, con una excepción notoria: hombre y mujer tienen las mismas probabilidades de padecer la diabetes de tipo 1 (una de las pocas enfermedades autoinmunitarias sin predominio femenino), pero, en cambio, en los ratones DNO afecta al doble de hembras que de machos.

Danska sabía que los factores ambientales a veces interactúan con los genes y estaba analizando las bacterias intestinales como factor de riesgo. Se preguntó si, en esos ratones, las diferencias en la microbiota intestinal podrían guardar relación con el desequilibrio en la incidencia de la diabetes. Para comprobarlo, criaron un grupo de ratones DNO en un entorno estéril, desprovisto de bacterias y virus, incluso de las bacterias comensales que normalmente pueblan el tubo digestivo.

Ahí fue cuando Danska hizo su primer descubrimiento estelar. Al analizar cuántos roedores criados en condiciones de esterilidad se volvían diabéticos en la edad adulta, «la diferencia entre los sexos se desvaneció por completo». Los machos tenían entonces la misma probabilidad de sufrir diabetes que las hembras. «Era un hallazgo sensacional, totalmente inesperado. No me lo podía creer», recuerda.

Así que repitieron el experimento, con el mismo resultado. Los sucesivos estudios les deparaban más sorpresas. Tomaron las bacterias de machos DNO adultos y las transfirieron a hembras DNO jóvenes que todavía no habían desarrollado la diabetes. Crecieron sanas y no tuvieron diabetes al llegar a adultas.

Los resultados de Danska, publicados en *Science* en 2013, demostraban por primera vez que «la flora intestinal puede modular la autoinmunidad de predominio femenino», destaca Martin Kriegel, reumatólogo e inmunólogo clínico de la Universidad de Münster, en Alemania. Es un hallazgo importante, añade, que todavía se está tratando de entender.

Nadie sabe por qué es protectora la microbiota intestinal de los machos. No obstante, el equipo de Danska ha constatado que la testosterona resulta crucial: en la sangre de los ratones DNO criados en esterilidad, observaron que los machos más propensos a la diabetes tenían niveles más bajos de testosterona que los portadores de la flora normal. Asimismo, cuando las bacterias de los machos colonizaron el tubo digestivo de las hembras y estas quedaron aparentemente protegidas contra la diabetes, sus niveles de testosterona en la circulación resultaron más altos que en las criadas con la flora habitual.

Todo ello apunta a que hay algo en las bacterias de los machos que incrementa la testosterona y confiere protección. Danska y sus colaboradores probaron a extraer las bacterias intestinales de los machos y transferirlas a las hembras, pero esta vez bloqueando la señalización de la testosterona; de nuevo estas volvieron a correr más riesgo de padecer la diabetes de tipo 1. Esto coincide con las investigaciones sobre el lupus en los hombres, en que se ha visto que la inhibición de la testosterona agrava el riesgo de sufrirlo. (También concuerda con los estudios realizados en una cepa de ratonas especialmente propensas al lupus. Cuando se eliminan las bacterias intestinales de estas hembras, el riesgo disminuye, según publicó en 2020 un equipo de la Universidad de Medicina de Carolina del Sur en *Journal of Immunology*).

No está claro cómo regula la testosterona los microbios, o viceversa. La investigación de Danska hace pensar que la composición de las bacterias comensales diverge en los ratones de ambos sexos a partir de la pubertad, así que

algo les ocurre a las bacterias en torno a ese momento. Esto podría explicar, incluso, por qué no hay grandes diferencias sexuales en la incidencia de la diabetes de tipo 1 en las personas, ya que esta suele aparecer antes de la pubertad, cuando la microbiota todavía no habría influido en el riesgo. Podría ser que las bacterias se vieran afectadas por el repentino influjo de hormonas sexuales que brota en la pubertad, si bien, casi con toda seguridad, se trata de una «carretera de dos sentidos», en palabras de Kriegel. Es decir, las bacterias reaccionan a las hormonas sexuales y viceversa.

EN POS DEL EQUILIBRIO

Por supuesto, un ratón no es un ser humano. Pero Danska cree que sus estudios tienen trascendencia en las enfermedades autoinmunitarias de predominio femenino. Quizás algunas bacterias intestinales de la mujer sean fundamentales en el desarrollo de la autoinmunidad. De ser así, su manipulación tal vez permitiría acabar con la enfermedad.

Danska y Kriegel confían en que sea posible diseñar terapias dirigidas a las bacterias, que reconfiguren la microbiota femenina para que sea protectora. Otros investigadores están analizando cómo ajustar la señalización de las hormonas sexuales para mitigar el riesgo asociado. Cuanto mejor se conozca la vulnerabilidad vinculada al sexo femenino, más factibles serán las intervenciones de carácter preventivo.

Puesto que el cromosoma X, las hormonas sexuales y la flora intestinal femenina parecen agravar el riesgo de autoinmunidad, se diría que la biología conspira de alguna forma contra la mujer. Pero esta carga autoinmunitaria puede verse desde otro prisma: como reflejo de la importancia de la mujer para la supervivencia de la especie. «En lo que se refiere a la inmunidad, las mujeres hemos de hacer todo tipo de proezas que los hombres no hacen», señala Danska. La autoinmunidad podría ser el precio que paga el organismo femenino por su dinamismo; pero es una carga que, al menos, la ciencia quizá sí consiga eliminar. ✦

PARA SABER MÁS

The pregnancy pickle: Evolved immune compensation due to pregnancy underlies sex differences in human diseases. Heini Natri et al. en *Trends in Genetics*, vol. 36, n.º 7, págs. 478-488, julio de 2019.
The dynamic epigenetic regulation of the inactive X chromosome in healthy human B cells is dysregulated in lupus patients. Sarah Pyfrom et al. en *PNAS*, 118 (24), junio de 2021.
Sex differences in the gut microbiome drive hormone-dependent regulation of autoimmunity. Janet G. M. Markle et al. en *Science*, vol. 339, n.º 6123, págs. 1084-1088, marzo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Autoinmunidad. Lawrence Steinman en *IyC*, noviembre de 1993.
El lupus, sus causas y posibilidades de tratamiento. Moncef Zouali en *IyC*, mayo de 2005.
Una medicina adaptada a las mujeres. Marcia L. Stefanick en *IyC*, noviembre de 2017.

EN BUSCA DE LA ESPECIFICIDAD

La inhibición indiscriminada del sistema defensivo como freno a las enfermedades autoinmunitarias debe dar paso a tratamientos más selectivos

Marla Broadfoot

A LOS 14 AÑOS, A MAGDELENE QUINTERO SE LE LLENÓ la boca de úlceras que convertían en un suplicio el comer y beber. La piel tostada del puente de la nariz y de las mejillas se le encendió de rojo carmesí. Las yemas de los dedos se le cubrieron de llagas, como si las hubiera sumergido en ácido. Sufría subidas de fiebre y dolores de cabeza, adelgazó y siempre se encontraba cansada.

Pasó un año de consulta en consulta hasta saber que padecía lupus, una enfermedad autoinmunitaria crónica y potencialmente mortal que cursa con dolor, inflamación y lesiones en cualquier parte del cuerpo. Y transcurrieron otros dos hasta que el único reumatólogo del Servicio Indígena de Salud que atiende en su localidad, Jones, en Oklahoma, logró dar con los medicamentos y las dosis adecuadas para controlar los síntomas.

Aun así, Magdelene, que ahora tiene 25 años, se considera afortunada. El lupus también ha afectado a su hermana pequeña, Isabel Hernández, de una forma más aterradora. Comenzó a sangrar por la nariz sin cesar. En el momento del diagnóstico, a los 17 años, sufría una hemorragia pulmonar cuyas consecuencias la mantuvieron conectada a un respirador durante 88 días, al cabo de los cuales tuvo que aprender de nuevo a caminar, hablar y comer. Hoy, con 21 años, los riñones le están fallando, por lo que ha de someterse a sesiones diarias de diálisis durante varias horas para filtrar la sangre, en espera de un trasplante.

«Es desolador», dice Magdelene, que acaba de cursar un máster en ciencias biomédicas en la Universidad Estatal de Oklahoma. Le preocupa que el futuro le depare un destino similar. «Pero también me siento agradecida por mi salud y afortunada de que los medicamentos que tomo estén funcionando», añade.

Al lupus se le ha llamado «el gran imitador» porque sus síntomas, que comprenden fiebre, cansancio, dolor articular, erupciones cutáneas, dolores de cabeza, problemas de memoria e insuficiencia orgánica, a menudo semejan muchas otras afecciones autoinmunitarias. Esas manifestaciones revelan las variadas formas en las que el cuerpo se nos puede volver en contra, por culpa de un sistema inmunitario que, fuera de control, ataca a nuestras células sanas.

Hace décadas que los tratamientos contra el lupus y otras enfermedades autoinmunitarias consisten en estrategias radicales que, en esencia, sojuzgan un sistema inmunitario rebelde. Pero tales métodos causan daños que a veces son peores que la enfermedad. El principal de ellos son los corticosteroides, con una capacidad sin parangón para amortiguar la respuesta inmunitaria, pero que dejan al paciente indefenso ante infecciones peligrosas, incluso mortales.

Investigaciones recientes están renovando el modo de tratar las enfermedades autoinmunitarias, con un enfoque más matizado. Repartido por todo el cuerpo, el sistema inmunitario humano teje una red compleja de células, órganos, tejidos y proteínas de numerosos tipos, que se comunican a través de multitud de mensajeros químicos. Los modernos análisis de genes y la ingeniería molecular permiten escrutar partes concretas de esa red en busca de nuevas dianas con que tratar la autoinmunidad con mucha más precisión. Algunos de esos nuevos tratamientos persiguen poner trabas a los autoanticuerpos, unos anticuerpos díscolos que atacan a las células sanas. Otras obstaculizan a los esenciales mensajeros que viajan entre las células inmunitarias.

Pero esos tratamientos no siempre funcionan y muchas de esas enfermedades demuestran ser recalcitrantes, razones por las que numerosos afectados recurren a métodos al margen de la medicina convencional. Con la sucesión de éxitos y fracasos se está extendiendo entre los científicos una nueva visión del precario equilibrio corporal que media entre la protección y la patología. La mitad del sistema inmunitario está diseñada para luchar, con los linfocitos T citotóxicos y los linfocitos B productores de los anticuerpos como actores. La otra mitad lo está para mantener la paz, básicamente formada por los linfocitos T reguladores. Cuando la primera se descarría y la segunda no logra meterla en vereda, surge una enfermedad autoinmunitaria. «Todos y cada uno de nosotros tenemos el potencial de generar autoinmunidad», explica V. Michael Holers, reumatólogo de la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado, «porque nuestro sistema inmunitario se desarrolla con esta suerte de yin y yang».

ALERTA TEMPRANA

Durante décadas, los corticosteroides (prednisona, dexametasona, etc.) han sido el pilar del tratamiento contra las enfermedades autoinmunitarias. Estos potentes antiinflamatorios interrumpen indiscriminadamente la producción de citocinas: los mensajeros clave que movilizan a nuestro vasto ejército de glóbulos blancos cuando se percibe una amenaza. A pesar de su gran eficacia a la hora de paliar los signos y síntomas de la autoinmunidad, pasan tan alta factura que algunos los comparan con hacer un pacto con el diablo. Muchos quedan condenados a tomarlos durante gran parte de la vida, por vía oral o en inyección, aun a pesar de los numerosos efectos secundarios que pueden acarrear, como cataratas, cambios del estado de ánimo, aumento de peso, dificultad para dormir, osteoporosis, hipertensión arterial, hiperglucemia y riesgo de infección.

Además, cuando un paciente aquejado por un trastorno autoinmunitario busca tratamiento, casi siempre el daño ya es considerable. Los autoanticuerpos llevan meses o años circulando con sigilo por la sangre y los tejidos, dañando sin cesar los órganos afectados: páncreas, riñones, articulaciones, intestino, piel, folículos pilosos, cerebro o médula espinal. Por consiguiente, los tratamientos como los corticosteroides son de naturaleza defensiva, destinados a evitar el empeoramiento o mitigar los brotes.

En la actualidad hay un gran empeño en la comunidad médica por pasar a la ofensiva y corregir los desequilibrios autoinmunitarios antes de que se cobren sus consecuencias más devastadoras. Se espera que el tratamiento y la prevención precoz reduzcan la carga que suponen las enfermedades autoinmunitarias, del mismo modo que tratar a las personas con alto riesgo cardiovascular con antihipertensivos e hipocolesterolemiantes ha reducido los infartos de miocardio y los ictus. Varios ensayos están examinando esta idea en la diabetes de tipo 1, la artritis reumatoide, el lupus y la esclerosis múltiple.

Ya se han cosechado los primeros éxitos. En un estudio se reclutó a 76 personas con antecedentes familiares de diabetes de tipo 1 que presentaban niveles anormales de glucosa en la sangre y por lo menos dos autoanticuerpos relacionados con la diabetes. La mitad recibió un fármaco experimental, un anticuerpo monoclonal llamado teplizumab que frena el ataque inmunitario a las células β productoras de la insulina en el páncreas. La otra mitad recibió placebo. Más de un lustro después, solo el 50 por ciento de las tratadas quincenalmente con el medicamento manifestaban la enfermedad, en comparación con el 78 por ciento de las que recibieron el placebo. Se calcula que, en los casos en que apareció la enfermedad, el tratamiento precoz retrasó su inicio casi tres años.

«Es muy importante», comenta Carla Greenbaum, endocrinóloga que preside *TrialNet Pathway to Prevention*, la red de ensayos clínicos que dirige el mencionado estudio y otros similares. «Esta enfermedad repercute en cada hora de cada día, así que todo el tiempo que uno pueda vivir sin ella cuenta.» Con el refinamiento de esta estrategia, los expertos confían en ampliar el período sin la enfermedad y, tal vez, descubrir formas de evitar la destrucción

Marla Broadfoot es escritora científica y doctora en genética y biología molecular.



FOTOGRAFÍA DE ANGELIKA KOLLIN

EN SÍNTESIS

Un gran inconveniente de los tratamientos actuales contra los trastornos autoinmunitarios es su radicalidad, que provoca numerosos efectos secundarios y vulnerabilidad ante las infecciones.

Se investigan nuevas terapias dirigidas contra trastornos como el lupus, la esclerosis múltiple o la psoriasis que sean más específicas. Algunas pasan por dotar al sistema inmunitario de medios con los que neutralizar a las propias células o anticuerpos anormales.

La escasez de resultados ha fomentado la búsqueda de remedios paliativos o retardantes, en ocasiones alejados de la ortodoxia médica, con frutos desiguales hasta la fecha.



LAS HERMANAS Isabel Hernández (*izquierda*) y Magdelene Quintero sufren lupus.

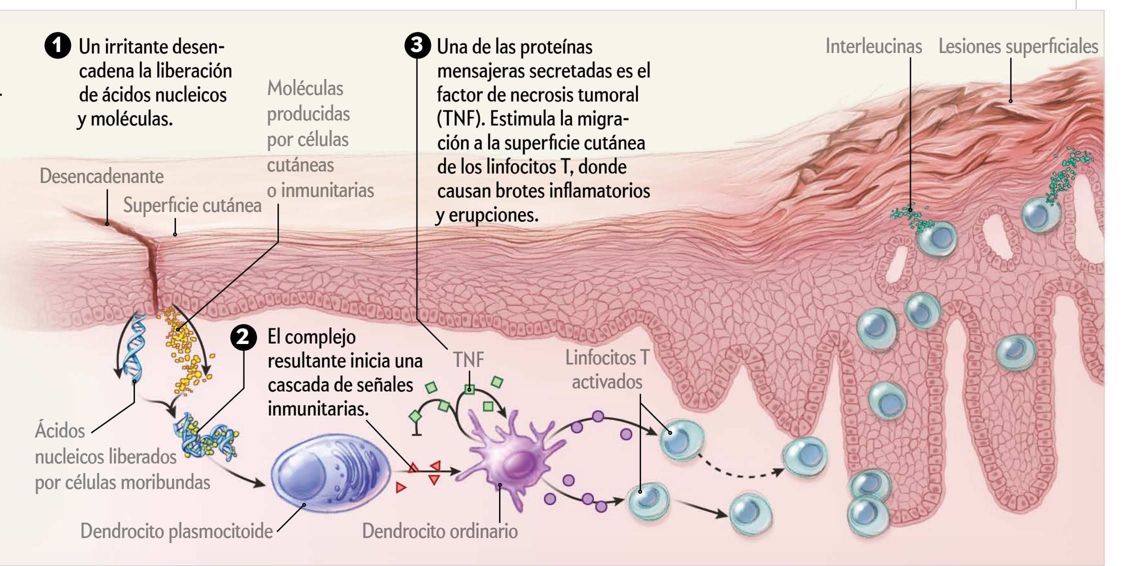
PARADOJAS DEL TRATAMIENTO

Bloqueo inmunitario contra la psoriasis

En la psoriasis, las células cutáneas crecen y proliferan sin freno hasta formar lesiones hinchadas y enrojecidas que llegan a cubrir grandes zonas del cuerpo, acompañadas de descamación y picor. Ese crecimiento descontrolado es, en esencia, la respuesta a un ataque inmunitario. El factor de necrosis tumoral (TNF) dirige las células inmunitarias contra la piel. Los fármacos anti-TNF que lo bloquean, como el adalimumab, han demostrado ser bastante eficaces, pero en algunos pacientes desencadenan un nuevo brote en la que ha sido llamada psoriasis paradójica.

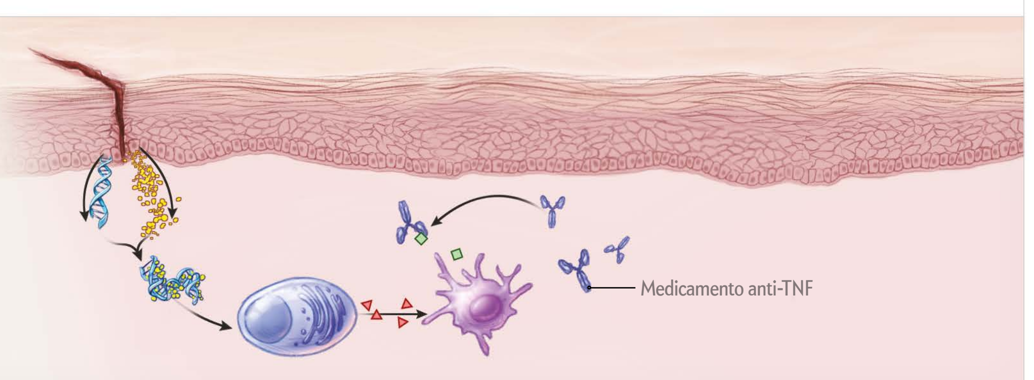
Psoriasis clásica

La causa es poco conocida, pero podría ser genética o por contacto ambiental. Por el motivo que sea, los dendrocitos migran hacia las capas cutáneas y se transforman en variantes más especializadas que liberan TNF. La señal del TNF estimula varios tipos de linfocitos T, que comienzan a afluir en masa a la piel. Estos, a su vez, liberan interleucinas, que actúan como señal para que las células cutáneas adopten el estado de hipercrecimiento responsable de las lesiones. Es una enfermedad crónica, con remisiones y rebrotes.



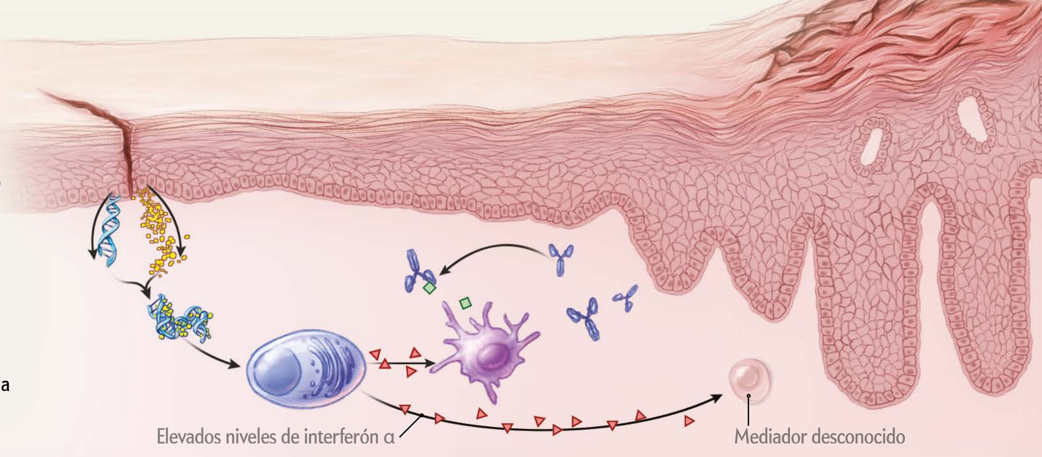
Ruptura del ciclo

Los medicamentos anti-TNF como el adalimumab y el etanercept cortan de forma radical esa cascada de acontecimientos. Como bloquean la producción y secreción de TNF en los dendrocitos, impiden que esta molécula estimule a los linfocitos T. Interrumpido el ciclo inflamatorio, las lesiones desaparecen o menguan notablemente.



Efecto paradójico

Los medicamentos anti-TNF generan nuevas lesiones psoriásicas en el 2 al 5 por ciento de los pacientes. La psoriasis paradójica podría tener su origen en el bloqueo del TNF en los dendrocitos. Además del TNF, estos producen otra señal inflamatoria, el interferón α. La supresión del TNF parece aumentar la producción de interferón, que desencadena su propia cascada inflamatoria en la piel a través de un intermediario desconocido.



FUENTE: «PSORIASIS: CLASSICAL VS. PARADOXICAL. THE YIN-YANG OF TNF AND TYPE I INTERFERON», DE ALESSIO MYLONAS Y CURDIN CONRAD, EN *FRONTIERS OF IMMUNOLOGY*, 2018 (*referencia*); DAVID CHENEY (*ilustración*)

completa. Greenbaum cree, además, que el planteamiento funcionará con otras dolencias. «Somos el modelo para todos los demás trastornos autoinmunitarios que ahora revelan también largos períodos asintomáticos», afirma.

La esclerosis múltiple es otra afección autoinmunitaria donde la detección precoz es crucial. Afecta al sistema nervioso central y se caracteriza por las lesiones de la sustancia blanca, zonas del cerebro y la médula espinal cuyos nervios quedan despojados de su cubierta protectora de mielina. Durante la última década se han hallado esas anomalías en cientos de personas sin síntomas de esclerosis múltiple, descubiertas de manera fortuita porque una conmoción cerebral o una migraña sin relación alguna las condujo al interior de un escáner. David Hafler, neurólogo de la Facultad de Medicina de Yale, cree que estos casos, conocidos como síndrome radiológico aislado, podrían representar la etapa más temprana conocida de la esclerosis múltiple. Su grupo ha comenzado un estudio multicéntrico con la firma de biotecnología Genentech para tratar este síndrome con ocrelizumab, que se suele emplear en las etapas posteriores de la enfermedad. Y Hafler busca otros rasgos biológicos que permitan intervenir incluso antes de que aparezcan las lesiones. «El tratamiento definitivo contra la autoinmunidad pasa por identificar [a las personas de alto riesgo] y tratarlas antes de que comience realmente la enfermedad», sostiene.

AFINAR EL OBJETIVO

Los fármacos como los anticuerpos monoclonales poseen la gran virtud de actuar dirigidos contra los elementos específicos del sistema inmunitario que causan una enfermedad determinada, de modo que, a diferencia de los corticosteroides, mantienen la funcionalidad del resto del sistema. Pero por selectivos que sean, el nuevo enfoque no está exento de dificultades y, aunque ha ampliado las opciones terapéuticas, también ha fracasado o ha resultado contraproducente en algunos casos, que empeoraron. Alcanzar la armonía en el sistema inmunitario no es un meta fácil.

Varias terapias dirigidas tienen como blanco una citocina especialmente potente llamada factor de necrosis tumoral (TNF), que se descontrola en numerosas enfermedades autoinmunitarias y provoca oleadas de inflamación nociva. Los anticuerpos monoclonales que bloquean su acción son hoy de uso generalizado en la artritis reumatoide, la enfermedad inflamatoria intestinal y la psoriasis. En cambio, los ensayos clínicos en la esclerosis múltiple demostraron que los inhibidores del TNF en realidad la exacerban. «Es una de las grandes paradojas de la autoinmunidad», apunta Hafler. Se ha comprobado, además, que la terapia dirigida que suprime una enfermedad autoinmunitaria en un paciente puede desatarla en otro.

El único medicamento nuevo aprobado para tratar el lupus en casi 60 años, el belimumab, es una terapia dirigida. Bloquea una citocina llamada estimulador de linfocitos B (BLyS), que mantiene en funcionamiento a los linfocitos B autorreactivos, lo que prolonga las reacciones autoinmunitarias. Aunque el tratamiento ha funcionado en muchos pacientes, un porcentaje considerable no obtiene ningún beneficio, lo que hace pensar en la implicación de diferentes mecanismos moleculares en las distintas personas, en opinión de Judith James, reumatóloga de la Fundación de Investigación Médica de Oklahoma.

Por suerte, los avances que ya hacen posible el análisis de las diferencias genéticas entre los pacientes y entre las enfermedades, están sacando a la luz pistas que podrían explicar los fracasos y señalar el camino hacia futuros éxitos. Por ejemplo, los intentos de tratar la alopecia *areata*, un trastorno autoinmunitario que afecta a los folículos pilosos y que causa la caída de grandes mechones de cabello, se han basado por lo común en dar un nuevo uso a medicamentos contra la psoriasis y la dermatitis atópica, afecciones cutáneas aparentemente afines. Ninguno ha funcionado. Cuando Angela Christiano, genetista de la Universidad de Columbia, que padece alopecia, finalizó un estudio sobre la base genética del trastorno, de repente se percató del motivo. «Se puede leer como un mapa de carreteras. La razón por la que fallaron es que no compartimos ninguna vía genética con esas dos afecciones», dice. Christiano ha averiguado que la alopecia *areata* tiene más en común con la artritis reumatoide, la celiaquía y la diabetes de tipo 1 que con las dolencias de la piel. «Creo que es un buen ejemplo de cómo la genética nos lleva a replantear por completo las cuestiones», añade.

La terapia dirigida que suprime una enfermedad autoinmunitaria en un paciente puede desatarla en otro

Uno de los genes descubiertos, el *ULBP3*, actúa como una señal de alarma que las células dañadas emiten para indicar a los linfocitos T citotóxicos que deben eliminarlas. El gen normalmente solo se activa si la célula es cancerosa o bien está infectada o moribunda. Pero en los folículos pilosos afectados por la alopecia permanece activo de forma permanente, en una llamada constante a la destrucción de las propias células. Para la emisión de la señal se produce un tipo de citocina llamada cinasa de Jano (JAK). Christiano demostró que los inhibidores de JAK, una clase de fármacos a la que se recurre a menudo para interrumpir la transmisión de señales autoinmunitarias en la artritis reumatoide, podrían frustar el ataque de los linfocitos T citotóxicos contra los folículos pilosos. A los pocos meses de tratamiento, algunos pacientes con calvicie recobraron el cabello. Cuando a Christiano le diagnosticaron alopecia al inicio de su carrera, no se sabía si mejoraría o empeoraría, y su única opción consistía en inyectarse corticosteroides en el cuero cabelludo. Su trabajo ha llevado hoy a múltiples ensayos avanzados de inhibidores de JAK para la enfermedad.

Cinco fármacos de esta clase ya han sido aprobados contra otras enfermedades autoinmunitarias e inflamatorias, al tiempo que muchos otros están en desarrollo. Con

todo, no se pueden garantizar grandes avances y hasta los últimos tratamientos dirigidos podrían tener efectos indeseados. Por citar un caso, el pasado febrero, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos advirtió de un mayor riesgo de problemas de corazón y cáncer asociado a un inhibidor de JAK administrado contra la artritis reumatoide.

«Esa es la realidad de las terapias contra las enfermedades autoinmunitarias en este momento, así que siempre digo que vale la pena buscar el menor de los males», asegura Aimee Payne, dermatóloga de la Universidad de Pensilvania, que está desarrollando terapias génicas para el pénfigo vulgar, un trastorno minoritario de la piel de carácter autoinmunitario. Las personas que lo padecen son portadoras de autoanticuerpos que atacan a la proteína desmogleína-3 (DSG3), que en circunstancias normales mantiene unidas las células de la piel. Su destrucción provoca la aparición de ampollas dolorosas por todo el cuerpo, acompañadas en ocasiones de infecciones potencialmente mortales que exigen tratamiento en las unidades de quemados.

Payne ha ideado un tratamiento dirigido, probado en ratones, que podría eliminar la población concreta de linfocitos B que produce esos autoanticuerpos, sin dañar a las demás. El sistema inmunitario cuenta con miles de millones de linfocitos B, de variados tipos. La inmensa mayoría fabrica los anticuerpos necesarios para combatir los virus y las bacterias. Por suerte, los linfocitos B anti-DSG3 son fáciles de detectar porque llevan un marcador inconfundible en la superficie, en esencia una versión del autoanticuerpo anti-DSG3. «En cierto sentido, son pésimos en lo suyo, porque anuncian de antemano que van a atacar», comenta Payne.

Magdelene y su hermana sienten que el lupus domina su vida. La segunda toma 19 medicamentos para controlar los síntomas

Para acabar con esas células perjudiciales se sirvió de una técnica ideada por su colega Michael Milone, con la que se ha conseguido eliminar con éxito los linfocitos B malignos en ciertos tumores de la sangre. Conocido como tratamiento con linfocitos T-CAR, el método emplea linfocitos T citotóxicos que han sido genomodificados para que expresen un receptor antigénico quimérico (CAR), que actúa a modo de baliza de localización. Este dirige a los linfocitos T hacia otros tipos específicos de células, en una misión de búsqueda y destrucción. A fin de adaptar la técnica al tratamiento de enfermedades autoinmunitarias, el equipo dotó a los linfocitos T de una baliza derivada de fragmentos del autoanticuerpo anti-DSG3, que conduce directamente a los exterminadores hasta los linfocitos B anti-DSG3.

Cuando los investigadores infundieron los linfocitos T modificados genéticamente en ratones que son un modelo del pénfigo vulgar, las ampollas desaparecieron. Payne fundó una empresa de biotecnología para llevar el tratamiento a la fase de ensayos clínicos, que están en curso. Puesto que el tratamiento consiste en células vivas, capaces de multiplicarse y recordar su objetivo, cree que el efecto de una sola infusión podría durar décadas: «Mi sueño es que baste con una. Sería una terapia de precisión que curaría de raíz la enfermedad».

Otros han optado por una técnica parecida para decantar la balanza de la autoinmunidad hacia el otro lado. En lugar de movilizar a los linfocitos T citotóxicos, amplifican el poder apaciguador de los linfocitos T reguladores para refrenar al sistema inmunitario hiperactivo. Aún en pañales, el enfoque se ha mostrado prometedor en modelos animales de la colitis ulcerosa, la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide.

APARTE DE LOS MEDICAMENTOS

Los fármacos conforman el grueso del creciente arsenal contra las enfermedades autoinmunitarias, pero algunas de las incorporaciones más interesantes exploran alternativas para restablecer el equilibrio corporal.

Numerosas funciones corporales básicas se rigen por dos fuerzas opuestas: frecuencia cardíaca, presión arterial, digestión, frecuencia respiratoria y excitación sexual. El sistema nervioso simpático inicia la respuesta enérgica de «lucha o huida», en tanto que el sistema parasimpático la detiene y prepara el cuerpo para «descansar y digerir». El paso de un estado a otro depende en gran medida del nervio vago, un haz de 100.000 fibras nerviosas que desciende desde el tronco encefálico hasta el diafragma antes de ramificarse hacia el corazón, el intestino y otros órganos. Según algunas investigaciones, ese potente haz comenzaría a funcionar mal como preámbulo de las enfermedades autoinmunitarias. «Sería como si fallaran los frenos en plena bajada de un puerto de montaña», afirma Kevin Tracey, neurocirujano de los Institutos Feinstein de Investigación Médica, con sede en Manhasset, Nueva York.

Tracey ha demostrado que la estimulación del vago con pequeños impulsos eléctricos restablece el sistema nervioso y contribuye a calmar a las células inmunitarias hiperactivas. Él y otros han seguido las señales emitidas por un pequeño dispositivo eléctrico implantado en el cuello, a lo largo de su recorrido por el nervio vago hasta el bazo, donde detuvieron la producción de TNF y de otras moléculas inflamatorias. De los ensayos clínicos iniciales se desprende que esos pequeños estímulos vagales podrían reducir la gravedad de la artritis reumatoide y de la enfermedad de Crohn, aún aplicados mediante un dispositivo menos invasivo, implantado sobre una de sus ramas cercanas al oído, donde se presiona contra la piel. Una empresa cofundada por Tracey puso en marcha recientemente un ensayo multicéntrico, aleatorizado y controlado del estimulador implantable. (La FDA ya ha aprobado estimuladores vagales parecidos como tratamientos contra la epilepsia y la depresión.)

Otro método heterodoxo pretende corregir el desequilibrio del sistema inmunitario con una intervención ciertamente poco refinada: el trasplante fecal. La idea de trasplantar heces de una persona a otra se remonta a la antigua medicina china, que trataba la intoxicación

alimentaria y la diarrea graves con una lechada de heces llamada «sopa amarilla». Hoy, los trasplantes fecales constituyen un tratamiento aceptado para una peligrosa infección intestinal causada por *Clostridium difficile*.

Hace unos años, la gastroenteróloga Jessica Allegretti y otros investigadores observaron en pacientes con trastornos originados por *Clostridium difficile* que el trasplante no solo resolvía la infección, sino que también aliviaba casos concurrentes de enfermedad inflamatoria intestinal (EII). Las fuertes molestias digestivas de la EII se deben a la inflamación y, aunque es objeto de debate, algunos creen que interviene una reacción autoinmunitaria. Los resultados «entusiasmaron al mundo científico por su potencial», relata Allegretti, que dirige el programa de trasplante de microbiota fecal en el Brigham and Women's Hospital, en Boston. Además, el hallazgo tiene lógica. Las poblaciones de microorganismos intestinales (microbioma) muestran claras diferencias entre las personas sanas y las que padecen colitis ulcerosa, un subtipo de EII en el que parece intervenir la autoinmunidad. Lo más probable es que estos cambios reflejen un desequilibrio en el que los microbios proinflamatorios predominan sobre los antiinflamatorios.

Cuatro ensayos clínicos aleatorizados han examinado los trasplantes fecales en la colitis ulcerosa. Cerca de un tercio de los pacientes alcanzaron la remisión, una fracción similar a la observada con los medicamentos inmunodepresores. Se están llevando a cabo más estudios y ensayos clínicos con trasplantes en el marco de la artritis reumatoide, el lupus, la esclerosis múltiple y la alopecia *areata*, que ponen a prueba los límites de esta extraña modalidad de tratamiento.

FUERA DE LO ESTABLECIDO

La FDA no ha aprobado el trasplante fecal contra ninguna enfermedad, así que no es de esperar que pronto se convierta en un tratamiento autoinmunitario. Según Allegretti, conviene ir despacio: «Creo que existe la idea errónea de que, por ser "natural", es más inocuo que los medicamentos normales, lo que no me parece cierto en absoluto. Solo empezamos a conocer las consecuencias a largo plazo de estas terapias y creo que antes deben ser estudiadas debidamente, del mismo modo que con cualquier otro medicamento». La bibliografía rebosa de relatos de trasplantes caseros que salieron mal, como el de un hombre con colitis ulcerosa que probó con heces de su hijo pequeño y de su esposa y que acabó hospitalizado con una infección por citomegalovirus.

Sin embargo, muchos enfermos frustrados por la falta de terapias consolidadas e impacientes con los médicos que ofrecen poca ayuda y menos esperanza, están dispuestas a tomar las riendas de su salud y a emplear métodos heterodoxos o alejados de la medicina científica para aliviar sus síntomas. Un ejemplo es Joe Person, un ciudadano de Washington D.C. de 37 años que padece lupus. Cuando se lo diagnosticaron en el último año de universidad elaboró un árbol de decisiones con las posibles pruebas, complicaciones, resultados y medicamentos. En su primera cita con el reumatólogo, exigió que le administraran hidroxicloroquina, el antipalúdico que alivia los síntomas del lupus y es la base de los ensayos de prevención y tratamiento precoz.

Quince años después, Person atribuye a esa actitud decidida el hecho de que aún mantenga a raya la enfermedad, pese al cansancio y a la sensación de que el cerebro a veces le funciona despacio. «La conclusión que saqué de los reumatólogos es que me sentase a esperar el remedio», cuenta Person. «Por desgracia, quedarme de brazos cruzados va en contra de mi instinto de supervivencia. Quiero hacer todo lo que esté en mi mano, al menos para tener la convicción de que estoy explorando todas las opciones para ir por delante.» Entró en remisión después de pasarse al crudiveganismo, solo para sufrir un nuevo brote cuando devino alérgico a las verduras crudas. También ha instalado una cama de bronceado en el sótano de su casa para probar la teoría de que ciertas longitudes de onda de la luz ultravioleta alivian los síntomas, sin resultado positivo hasta el momento.

Algunos expertos están abiertos a las alternativas. Tracey piensa que, en teoría, técnicas como la acupuntura podrían reducir el estrés y la inflamación mediante la activación de ciertas ramas del sistema nervioso, si bien avisa de que con tales planteamientos a veces resulta «difícil probar la relación entre la causa y el efecto». Para fomentar un microbioma intestinal sano sin recurrir a peligrosas infusiones caseras de heces, Allegretti recomienda probar con alimentos ricos en fibra y seguir una dieta vegetariana. Y James aconseja a las personas con dolencias autoinmunitarias que no fumen y que duerman mucho, pues eso ayuda a paliar la inflamación: básicamente, «todas aquellas cosas que te decía tu madre», señala.

Magdelene y su hermana sienten que el lupus domina su vida. Isabel toma en este momento 19 medicamentos para controlar los síntomas. Magdelene, que solo precisa dos, ha dedicado los últimos años, primero en el laboratorio y después en la clínica, a intentar mejorar los tratamientos, siempre bajo la tutoría de James en la Fundación Médica de Oklahoma. Recuerda que su tía abuela, también enferma de lupus, pasó los últimos años en una silla de ruedas, con los huesos minados por los corticosteroides. «Entonces no había los tratamientos de ahora.» Hoy intenta entrar en la facultad de medicina o en un programa para asociados médicos, decidida a formarse para alterar el curso del mal que ha afligido a su familia. IyC

PARA SABER MÁS

Manipulating the microbiome with fecal transplantation to treat ulcerative colitis. Colleen R. Kelly y Ashwin N. Anantakrishnan en *JAMA*, 321(2), págs. 151-152, enero de 2019.
The role of a plant-based diet in the pathogenesis, etiology and management of the inflammatory bowel diseases. Charlene S. J. Grosse et al. en *Expert Review of Gastroenterology and Hepatology* 14(3), págs. 137-145, febrero de 2020.
Associations between smoking and systemic lupus erythematosus (SLE)-related cytokines and chemokines among US female nurses. Jill Hahn et al. en *Arthritis Care Research*, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El lupus, sus causas y posibilidades de tratamiento. Moncef Zouali en *IyC*, mayo de 2005.
Freno a la psoriasis. Marta Consuegra y Francisco Lozano en *IyC*, julio de 2019.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.

Energía nuclear a pequeña escala

La energía nuclear no requiere necesariamente grandes centrales. También puede emplearse en vehículos espaciales, submarinos o portaaviones

Cuando pensamos en la energía nuclear, la imagen que nos viene a la cabeza suele ser la de un penacho de vapor de agua sobre unas gigantescas torres de refrigeración. Sin embargo, esto no tiene por qué ser siempre así. Este tipo de energía puede generarse en dispositivos de tamaños muy diversos y hacer mucho más que proporcionar electricidad a la red. Hoy en día impulsa sondas espaciales, submarinos o portaaviones. Y, desde hace algunos años, los ingenieros han comenzado a diseñar centrales nucleares pequeñas, modulares y de media potencia. Todo ello nos brinda una excelente excusa para descubrir algunos de los mecanismos físicos que actúan en estos sistemas.

La famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ refleja el hecho de que la masa puede convertirse en energía y viceversa. En las reacciones químicas, las energías implicadas son del orden de centenares de kilojulios por mol, por lo que el cambio de masa asociado apenas sería del orden del nanogramo. No ocurre así en las reacciones nucleares, donde la energía liberada por

EL VEHÍCULO EXPLORADOR CURIOSITY, de la NASA, recorre el terreno de Marte utilizando energía nuclear. En su parte posterior lleva un generador térmico de radioisótopos (*flecha*), el cual presenta una longitud de unos 60 centímetros.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

la desintegración de los núcleos atómicos alcanza, por cada mol, decenas de miles de gigajulios, el equivalente a unas décimas de gramo. En última instancia, esa energía acaba presentándose en forma de calor, el cual puede convertirse en energía útil con el dispositivo adecuado.

Desintegraciones que calientan

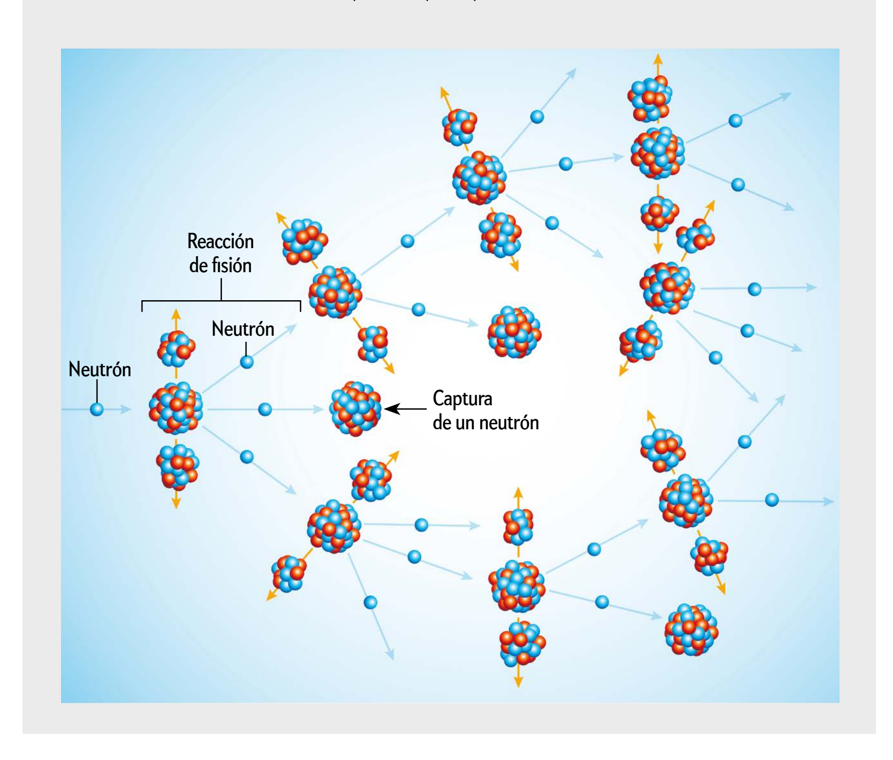
Entre los sistemas de producción de energía nuclear más sencillos que existen se encuentran los generadores termoeléctricos de radioisótopos. También conocidos como RTG, por sus siglas en inglés, en ellos se utilizan termopilas para convertir la energía en electricidad. Este es el tipo de dispositivo que alimentó las sondas Cassini o New Horizons en sus viajes a Saturno y Plutón, respectivamente. En estos casos los paneles fotovoltaicos habrían sido ineficaces, ya que, a medida que nos alejamos del Sol, el flujo de luz solar disminuye de manera considerable.

Los RTG también se emplean en los vehículos exploradores que recorren Marte, como el Curiosity y el Perseverance. Presentan la forma de un cilindro de 64 centímetros de diámetro y 66 de altura, y su masa asciende a 45 kilogramos, 4,8 de los cuales son óxido de plutonio-228. La desintegración natural de este isótopo produce una potencia térmica de 2 kilovatios al principio de la misión, la cual irá disminuyendo lentamente a lo largo de las décadas. Esto resulta más que suficiente para exploraciones prolongadas, por más que las termopilas tengan una baja eficiencia y solo proporcionen 120 vatios de potencia eléctrica [*véase* «Cuando el calor se convierte en electricidad», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, julio de 2017].

La ventaja de este tipo de generador es la ausencia total de piezas móviles: no hay riesgo de desgaste, se reducen las averías y no hay vibraciones que puedan perturbar los instrumentos de medición. Sin embargo, su uso se reserva para situaciones excepcionales, en las que el riesgo de dispersión de material radiactivo es bajo.

REACCIONES EN CADENA

CUANDO UN NÚCLEO DE URANIO-235 se ve alcanzado por un neutrón, se desestabiliza y puede fisionarse en dos núcleos menores. Este proceso suele emitir dos o tres neutrones, cada uno de los cuales podrá chocar a su vez contra otro núcleo de uranio e inducir sucesivas fisiones. Si el material fisible es lo suficientemente abundante, tales reacciones en cadena se multiplicarán exponencialmente. Los reactores nucleares son sistemas que mantienen bajo control el ritmo al que tienen lugar estas reacciones. La energía liberada en ellas se convierte en calor, el cual se emplea después para generar electricidad.



Controlar la fisión

Para las aplicaciones terrestres, la desintegración espontánea de los núcleos radiactivos no basta. Por ello, los reactores se construyen para aumentar y regular la tasa de desintegración mediante el control de las sucesivas reacciones nucleares. Los reactores de agua más comunes utilizan uranio-235, cuyo núcleo se torna inestable si absorbe un neutrón. Cuando eso sucede, se divide en dos núcleos menores y, en el proceso, emite entre dos y tres neutrones adicionales (2,4 de media).

Si todos esos neutrones provocaran a su vez una nueva reacción de fisión, el resultado sería una reacción en cadena con un aumento exponencial del número de divisiones atómicas. Por supuesto, este efecto debe evitarse. Por esa razón, los reactores nucleares se diseñan de forma que cada fisión acabe provocando exactamente una sola fisión más (algo más en el momento del arranque).

Para ello se pueden manipular varios parámetros. En primer lugar, la concentración de uranio-235: cuanto mayor sea esta, más fácil será provocar una reacción en cadena, pues la probabilidad de captura de neutrones aumentará. También puede influir el tamaño del reactor: cuanto más pequeño sea, más neutrones escaparán de la zona activa antes de haber provocado una nueva fisión. Esta es una de las pocas desventajas de la miniaturización.

Por último, los neutrones rápidos emitidos durante la fisión también pueden ser ralentizados, lo que aumenta la probabilidad de que sean reabsorbidos. De ahí el uso de un moderador; es decir, un elemento que frena los neutrones sin absorberlos. Este es el caso del hidrógeno del agua.

Para controlar la velocidad de reacción en un reactor, también se usan barras absorbentes de neutrones, las cuales pueden introducirse en mayor o menor medida en el núcleo del reactor, donde se encuentra el material fisible. Estas «barras de control» suelen ser verticales, de modo que caen naturalmente por su propio peso en caso de emergencia, lo que detiene por completo la reacción en cadena. Al elevarlas, se aumenta el número de fisiones, lo que incrementa la temperatura en el reactor. A continuación, el calor se extrae con ayuda de un fluido de transferencia de calor y, a partir de ahí, los pasos son muy similares a los de una central térmica tradicional.

Reactores modulares pequeños
Cabe destacar que, en todo lo anterior, el tamaño del reactor no constituye un factor determinante en la operación. Sin embargo, como las centrales nucleares se desarrollaron para la generación masiva de electricidad, los reactores se dimensionaron para producciones de gigavatios. Pero tales tamaños no son necesarios si la potencia que se pretende conseguir es más modesta. Por ejemplo, los reactores nucleares K15, utilizados en algunos submarinos y portaaviones, tan solo ocupan unas decenas de metros cúbicos y generan una potencia térmica de 150 megavatios.

En los últimos años, estas ideas han propiciado el desarrollo de pequeños reactores con potencias térmicas de unos 100 megavatios. Una de las principales razones es que estos reactores son transportables y modulares.

La empresa estadounidense NuScale ha diseñado un reactor con una carga de combustible nuclear 20 veces inferior a la de un reactor tradicional. Presenta una potencia térmica de 200 megavatios (lo que equivale a unos 60 megavatios de electricidad) y tiene dos años de autonomía. Está alojado en un cilindro de 23 metros de altura y 2,8 metros de diámetro que incluye el núcleo, el sistema de transferencia de calor y el generador de vapor.

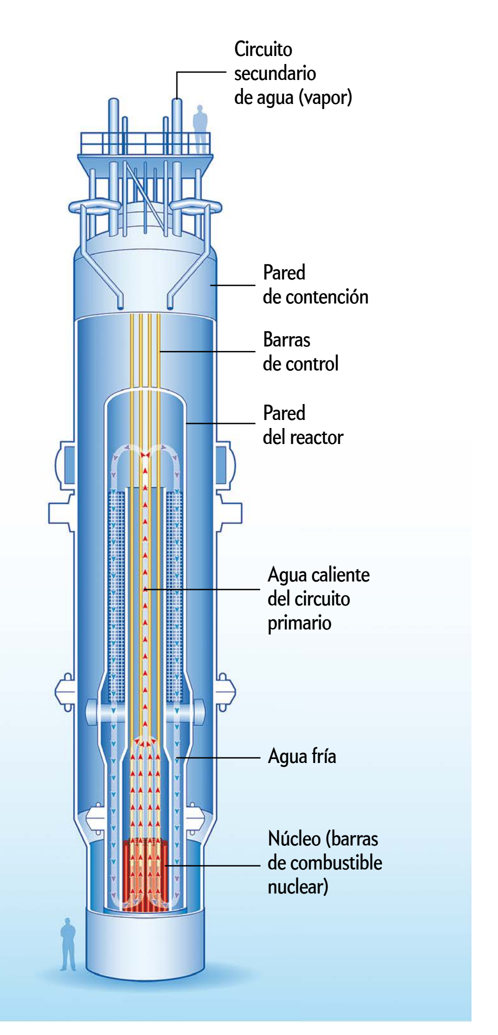
La compacidad del dispositivo reduce considerablemente la longitud de las tuberías necesarias y permite que los sistemas de seguridad sean totalmente pasivos (es decir, que no necesiten ser activados manualmente en caso de incidente). Por ejemplo, la circulación del agua en el circuito primario no necesita una bomba y se realiza de forma natural por el efecto termosifón, el cual se produce debido a la diferencia de densidad entre el agua caliente y la fría [*véase* «El sol calienta... y también enfría», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, octubre de 2016]. Por tanto, no es necesario un generador diésel de reserva en caso de incidente para hacer funcionar las bombas.

Con un peso de 700 toneladas, este reactor puede transportarse en tres segmentos por camión o barcaza, y su diseño permite la industrialización de todas las etapas de fabricación, carga, descarga y desmontaje. De este modo, los pasos más delicados se llevan a cabo en una fábrica específica y no allí donde se produce la electricidad.

Esta idea resuelve una serie de problemas inherentes a la fabricación, el funcionamiento y el desmantelamiento de las centrales nucleares tradicionales. Sin embargo, se produce a costa de otros inconvenientes; en concreto, del riesgo de dispersión de material nuclear si los emplazamientos de estos reactores son demasiado numerosos. IyC

REACTORES COMPACTOS

LA EMPRESA ESTADOUNIDENSE NUSCALE está desarrollando un reactor nuclear que puede alojarse en un cilindro de unos 23 metros de altura y menos de 3 metros de diámetro. Producirá 60 megavatios de electricidad, unas 15 veces menos que un reactor tradicional. El calor liberado en el material nuclear (*barras de combustible, abajo*) calienta el agua en un circuito cerrado. Esa agua, caliente y por tanto menos densa, sube y transfiere el calor a un segundo circuito (*arriba*), el cual produce vapor y hace girar una turbina (*no mostrada*). Una vez enfriada, el agua vuelve a bajar y se calienta de nuevo en la parte inferior. Las barras de control, que absorben neutrones, se insertan entre las barras de combustible para regular el ritmo de las reacciones de fisión.



SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Física cotidiana*, nuestro monográfico de la colección TEMAS con algunos de los mejores artículos publicados a lo largo de los últimos años en la sección «Curiosidades de la física».

www.investigacionyciencia.es/revistas/temas



PARA SABER MÁS

Multi-mission radioisotope thermoelectric generator. Documento de la NASA, 2020.
Highly available nuclear power for mission-critical applications. Jeremiah Doyle et al. en *Nuclear Technology*, vol. 206, págs. 1059-1074, febrero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Reinventar el combustible nuclear. Rod McCullum en *IyC*, agosto de 2019.
La energía nuclear, diez años después de Fukushima. Aditi Verma, Ali Ahmad y Francesca Giovannini en *IyC*, junio de 2021.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La ley de la muerte

Micromuertes, microvidas y la ley de Gompertz



GETTY IMAGES/ANASTASIIA_NEW/ISTOCK

EN 1825, EL ACTUARIO BRITÁNICO BENJAMIN GOMPERTZ descubrió una ley estadística capaz de determinar con una precisión asombrosa cómo aumenta nuestra tasa de mortalidad a medida que envejecemos. Hoy por hoy, el origen de dicha ley sigue siendo un misterio.

En la obra ya clásica *El hombre anumérico*, del matemático estadounidense John Allen Paulos, podemos leer que la probabilidad aproximada de no morir en un accidente doméstico es P(no morir en accidente doméstico) = 98%. Y también que P(no morir de enfermedad pulmonar) = 95%, P(no morir de locura) = 90%, P(no morir de cáncer) = 80%, y P(no morir de enfermedad cardíaca) = 75%. De modo que la probabilidad de librarse individualmente de cada una de estas muertes resulta alentadora. Pero ¿cuál es la probabilidad de morir por alguna de estas causas?

Suponiendo que todas ellas son independientes entre sí, para calcular la probabilidad de no morir por ninguna de las razones enumeradas arriba debemos multiplicar las probabilidades. Así, tenemos que P(no morir por ninguna de las causas anteriores) = $0{,}98 \times 0{,}95 \times 0{,}90 \times 0{,}80 \times 0{,}75 \approx 0{,}50$. Y ahora, utilizando la probabilidad complementaria, llegamos a la conclusión de que P(morir por alguna de estas causas) = $1 - 0{,}50 = 0{,}50$. Es decir, la mitad de los lectores de esta columna sufrirá alguna de las muertes que acabamos de mencionar.

Las probabilidades anteriores son fáciles de entender, o eso pensamos quienes trabajamos habitualmente con la teoría de la probabilidad. Pero no es el caso del ciudadano común. Un riesgo de 1 entre 1000, que en ciencias actuariales se denomina «poco común», es para un ciudadano medio, sin referencia alguna a otras probabilidades de riesgo cotidiano, una información difusa a efectos prácticos. Así ha ocurrido este año, por ejemplo, con la reacción de los medios y de parte de la población frente al riesgo de morir por un trombo tras vacunarse contra la COVID-19. Una propuesta para solucionar estas situaciones es el uso de la unidad *micromuerte*, un concepto introducido en los años setenta del pasado siglo por Ronald A. Howard, experto en teoría de la decisión.

Comparar micromuertes

Una micromuerte es una unidad de riesgo definida como una probabilidad de uno entre un millón de muerte súbita. Esto es aproximadamente la probabilidad de sacar 20 caras seguidas al lanzar una moneda justa ($1/2^{20} \approx 1/10^6$). Pero, para muchas personas, eso no transmite una información clara de la magnitud de esta microprobabilidad. Para conseguirlo, según los defensores de la unidad micromuerte, necesitamos usar el poder de la analogía y no el valor absoluto de las probabilidades.

La unidad micromuerte nos permite comparar los riesgos que conlleva, por ejemplo, una intervención médica, como vacunarse contra la COVID-19, y diferen-

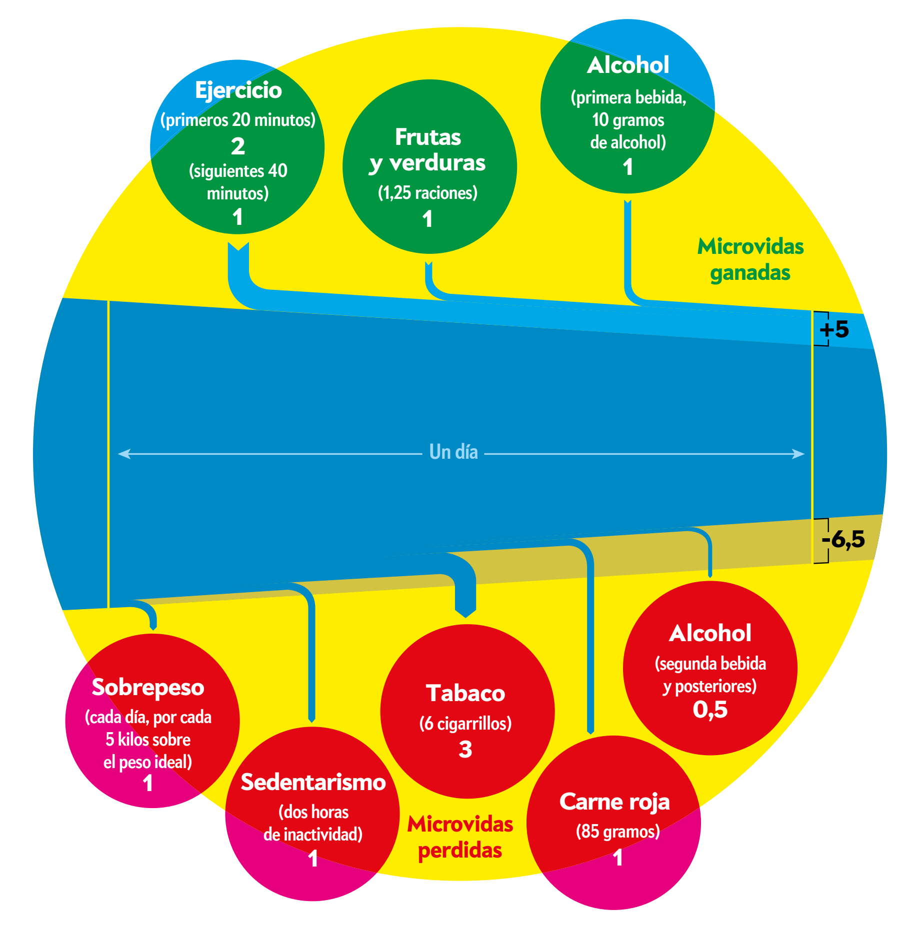
tes actividades cotidianas que nos resultan más comprensibles. Así, por ejemplo, la probabilidad de morir por trombosis a causa de la vacuna contra la COVID-19 se estima en 1 entre un millón, aproximadamente; es decir, en una micromuerte. Por su parte, una administración de anestesia general conlleva un riesgo de fallecimiento del orden de 1 entre 100.000; es decir, 10 micromuertes.

Uno de los adalides de esta manera de ver las cosas es David Spiegelhalter, estadístico de la Universidad de Cambridge conocido cariñosamente como *profesor Riesgo*. Cuando le preguntan si algo es peligroso, su respuesta suele ser: «¿Peligroso comparado con *qué*?».

Así pues, compare el caso de la vacuna con el riesgo de 0,7 micromuertes asociadas a un día de esquí, o con 1 micromuerte por cada 300 kilómetros de viaje en coche. Y confronte también el riesgo asociado a la anestesia general con el de 10 micromuertes por una inmersión submarina, o con las 7 micromuertes asociadas a correr una maratón. Si no sentimos la más mínima sensación de peligro cada vez que decidimos hacer un viaje en coche o correr una maratón, deberíamos sentir la misma indiferencia —más allá de la falta de costumbre— a vacunarnos o a someternos a una operación con anestesia general.

Como escribe Spiegelhalter, lo anterior puede generar polémicas, como la que intencionadamente provocó el profesor David Nutt, asesor del Gobierno británico en materia de drogas, al afirmar que el riesgo asociado a la ingesta de éxtasis era equivalente al de montar a caballo. Pero, sin duda, comunicar y comprender bien el riesgo nos ayuda a tomar decisiones racionales. De otra forma, seguiremos anclados en las anécdotas nada representativas que circulan en el boca a boca o en Internet, como «mi abuelo fumó hasta el último minuto de sus 95 años» o «un amigo de mi cuñado se curó de cáncer bebiendo zumo de apio». Aun suponiendo que tales historias sean ciertas, solo entrarían en la categoría de posibilidades, pero de ningún modo reflejarían una probabilidad, como sí parece deducir mucha gente.

La unidad micromuerte no se aplica a riesgos crónicos. El tabaquismo o la ingesta sostenida de tocino matan a la larga, no en el acto. El riesgo en estos casos se expresa mejor como una reducción de la esperanza de vida. Por eso, Spiegelhalter acuñó otra unidad de riesgo: la microvida, la cual corresponde a una esperanza de vida de media hora. En la ilustración adjunta vemos, por ejemplo, que ganamos 2 microvidas haciendo 20 minutos de ejercicio y que perdemos 3 de ellas por cada 6 cigarrillos. Por cierto, observemos que mientras que las micromuertes no son acumulativas, las microvidas sí lo son. Perdemos una microvida diaria por cada 5 kilos de sobrepeso, pero la probabilidad de 10 micromuertes por saltar en paracaídas, por ejemplo, vuelve a ponerse a cero en cada salto.



PARA MEJORAR LA COMUNICACIÓN del riesgo asociado a diferentes actividades, el estadístico David Spiegelhalter introdujo la unidad *microvida*, definida como una esperanza de vida de media hora. A partir de una colección de datos estadísticos referidos a la población general, es posible asociar una pérdida o ganancia de microvidas a distintos hábitos. Esta ilustración muestra algunos ejemplos.

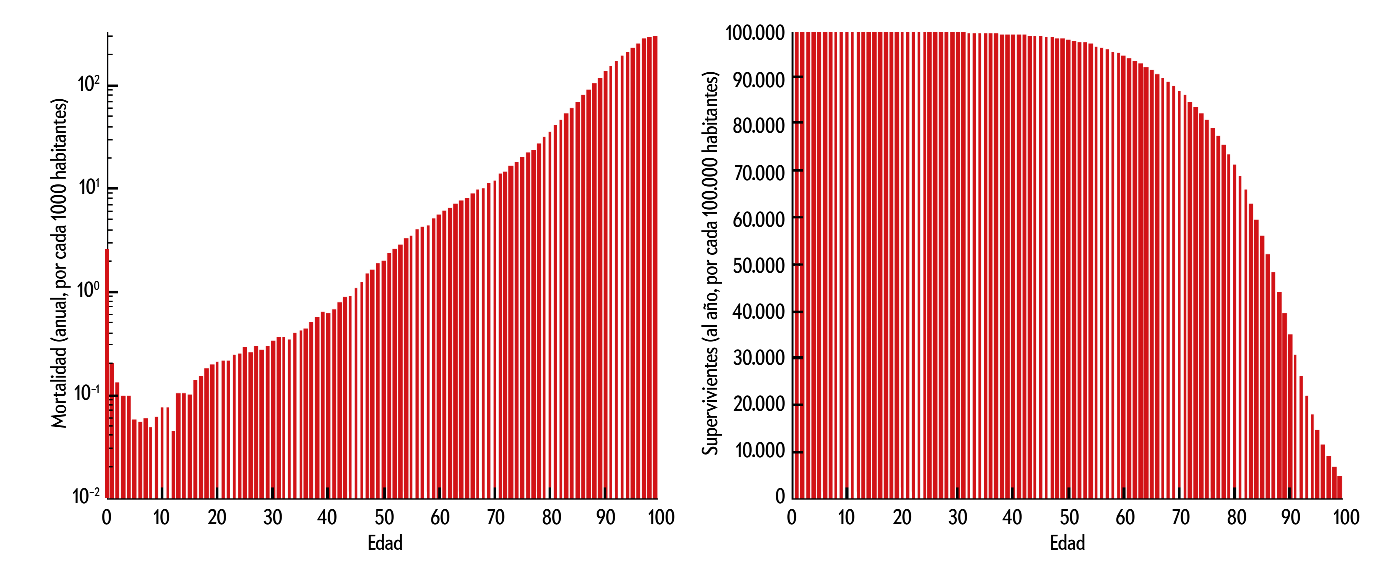
FUENTE: DAVID SPIEGELHALTER/LABORATORIO DE ESTADÍSTICA DE LA UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

La ley de Gompertz

Ahora que ya tenemos una idea más precisa sobre qué nos va a matar, seguro que también deseamos saber cuándo. En 1825, el actuario británico Benjamin Gompertz descubrió una fascinante ley empírica que nos da la respuesta. Estadísticamente hablando, claro.

La tasa de mortalidad suele expresarse como el número de muertes que tienen lugar en una población por año y por mil habitantes. Por tanto, puede entenderse como nuestra probabilidad de morir a lo largo del próximo año. Gompertz encontró que, en los humanos, la tasa de mortalidad aumenta exponencialmente con la edad, y que lo hace de tal modo que la probabilidad de morir se duplica cada 8 años.

Por ejemplo, yo tengo 55 años. Y si consultamos las tablas de mortalidad más recientes del Instituto Nacional de Estadística (de 2019 cuando escribo estas líneas), encontramos que la tasa de mortalidad para los españoles de 55 años es de 3,6 por cada 1000 habitantes. Podemos interpretar este dato empírico como que la probabilidad de morir a la edad de 55 años es de 3,6/1000 = 0,0036. Esto equivale a decir que todos los españoles de 55 años se juegan la vida en un macabro juego, donde cada uno lanza 8 veces una moneda y aquellos que obtienen por azar 8 caras mueren (esta última proba-



LA LEY DE GOMPERTZ establece que, en los humanos, la probabilidad de morir se duplica cada 8 años. Estas gráficas incluyen las tasas de mortalidad (*izquierda*) y de supervivencia (*derecha*) en España según los datos publicados en 2019 por el Instituto Nacional de Estadística. Con excepción de la primera infancia, las cifras se ajustan a la ley de Gompertz casi a la perfección.

FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA; BARTOLO LUQUE (*gráficas*)

bilidad es en realidad algo mayor, ya que $1/2^8 = 0{,}0039$, pero se perdona por el impacto de la analogía).

Según la ley de Gompertz, si aún sigo vivo dentro de 8 años, mi probabilidad de morir se habrá doblado. Es decir, a mis 63 años será $0{,}0036 \times 2 = 0{,}0072$. Según las tablas del INE, es 0,0071. Ese año lanzaré solamente 7 veces la moneda, y así sucesivamente cada 8 años (si no la palmo antes, claro). Por cierto, fumar 20 cigarrillos al día aproximadamente duplica nuestra probabilidad de morir. De modo que, según la ley de Gompertz, es equivalente a restarnos 8 años con independencia de nuestra edad.

En la primera de las gráficas adjuntas hemos representado en ejes semilogarítmicos la mortalidad por edades para la población española en 2019, donde cada valor asociado a una edad representa el número medio de individuos de un total de 1000 con esa edad que mueren a lo largo del año. Claramente se observa que la tasa de mortalidad para los adultos aumenta exponencialmente con el tiempo. Los datos se ajustan a la ley de Gompertz casi a la perfección, con tasas de mortalidad que se duplican cada 8 años.

En la gráfica vemos también que la mortalidad en el primer año de vida asciende a 2,6: un alto valor que no vuelve a darse hasta los 52 años. Tras el trauma del nacimiento, la mortalidad cae hasta 0,0045 a los 12 años, la edad más «segura». A partir de ahí se incrementa sin piedad, hasta ajustarse a la ley de Gompertz en el intervalo entre los 30 y los 80 años, con un crecimiento exponencial.

Las cosas se ven incluso peor si nos preguntamos por la probabilidad de supervivencia, la cual vemos representada en la segunda gráfica. Si la mortalidad crece exponencialmente con la edad, la probabilidad de supervivencia, a la que llamaremos $S(t)$, decrece superexponencialmente según la ley

$$S(t) = \exp[-0{,}0015 \cdot \exp((t - 25)/10)].$$

¡Una exponencial dentro de una exponencial! Este decrecimiento es tan sumamente rápido que, casi con certeza y en las condiciones actuales, ningún humano podrá superar los 125 años.

Al mostrar que, durante gran parte de la vida humana adulta, las tasas de mortalidad específicas por edad aumentan de manera exponencial, la ley de Gompertz acabó desempeñando un papel crucial en la estadística que sustenta, por ejemplo, la fijación de precios de los seguros de vida y las rentas vitalicias. Pero también, y a medida que el envejecimiento se convirtió en objeto de estudio científico, el modelo de Gompertz proporcionó una guía para la búsqueda de patrones semejantes no solo en los humanos, sino también en una amplia variedad de organismos.

De manera vergonzante, la esperanza de vida cambia enormemente de un país a otro, pero la ley de Gompertz persiste. De hecho, la misma ley se aplica a otras especies animales, para las que la probabilidad de morir se duplica cada cierto número particular de años. Así pues, resulta plausible pensar, como ya hiciera el propio Gompertz, que si esta ley es independiente de todos los condicionantes nacionales, debe ser el organismo el que lleva fecha de caducidad, y que los mecanismos responsables son endógenos.

Hoy por hoy existen muchos modelos que intentan dar cuenta de esta ley, pero ninguno parece convencer al grueso de los investigadores. Así que, aunque ya tenemos claro cómo y cuándo vamos a morir, el por qué sigue siendo un secreto custodiado por la Parca. IyC

PARA SABER MÁS

The power of the MicroMort. David Spiegelhalter en *BJOG: An International Journal of Obstetrics and Gynaecology*, vol. 121, págs. 662-663, mayo de 2014.

Deciphering death: A commentary on Gompertz (1825) 'On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies'. Thomas B. L. Kirkwood en *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, vol. 370, art. 20140379, abril de 2015.

El hombre anumérico: El analfabetismo matemático y sus consecuencias. John Allen Paulos. Tusquets, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Correlación no implica causalidad. Bartolo Luque en *IyC*, julio de 2016.

Comunicar la incertidumbre. Jessica Hullman en *IyC*, noviembre de 2019.

El problema de la significación estadística. Lydia Denworth en *IyC*, diciembre de 2019.



LA GUÍA DEL ZOÓLOGO GALÁCTICO
LO QUE LA FAUNA TERRESTRE REVELA SOBRE LA VIDA EXTRATERRESTRE
Arik Kershenbaum
Debate, 2021
368 págs.

Cuando empieces a escuchar, el cosmos te hablará

Otra manera de contemplar la búsqueda de vida extraterrestre

Las fábulas de Esopo presentan antagonismos y conflictos entre sus personajes. Se trata de animales con la capacidad de hablar y que se ven implicados en situaciones apuradas de las que se destila alguna moraleja. Entroncando con esta tradición clásica, con eslabones intermedios como La Fontaine o Samaniego, más de 2000 años después Rudyard Kipling planteó a Mowgli una máxima universal en *El libro de la selva* (1894): cuando empieces a escuchar, la selva te hablará.

En la actualidad, biólogos, físicos, ingenieros y lingüistas escudriñan la naturaleza intentando comprender los sistemas de comunicación que se desparraman en la biosfera. La vida se comunica masivamente en la Tierra, pero apenas entendemos un ápice de lo que se transmiten entre sí el resto de las especies con las que cohabitamos. La destrucción de ecosistemas implica una irreparable pérdida de biodiversidad. Siendo egoístas, desaparecen remedios naturales a las patologías que aquejan a la humanidad. Pero también organismos cuyos ignotos sistemas de comunicación podrían tener la clave para crear vida sintética o, también, para descifrar una potencial señal inteligente de origen extraterrestre.

Como niños salvajes abandonados en la selva cósmica, justo ahora hemos empezado a escuchar. En este contexto, *La guía del zoólogo galáctico*, de Arik Kershenbaum, intenta inferir cómo podrían ser las formas de vida extraterrestre partiendo de las características fundamentales de los seres vivos que conocemos.

Siguiendo la aproximación biosemiótica de Jakob Von Uexküll [*véase* «Los signos y el significado en la naturaleza», por Jon Umerez; Investigación y Ciencia, septiembre de 2021], Kershenbaum, zoólogo de la Universidad de Cambridge, ahonda en la comprensión de la *Umwelt*, de cómo el entorno biofísico configura los rasgos de los seres vivos y de cómo estos se relacionan en sus respectivos ecosistemas. Porque de la observación de la vida terrestre y de la aplicación de las leyes naturales emerge un universo de posibilidades exobiológicas de base científica.

El subtítulo de la obra, «lo que la fauna terrestre revela sobre la vida extraterrestre», es delimitador. Como zoólogo experto en comunicación animal, Kershenbaum propone una perspectiva zoocéntrica con la que huir del lastre del antropocentrismo, para así especular sobre la vida extraterrestre con desparpajo, conocimiento y todo el rigor que permite la prosa divulgativa. Abandona otros terrenos, como la comunicación de las plantas o el análisis de señales microbiológicas, los cuales hubiesen resultado inabordables en pocas páginas por más que a priori fuesen sugerentes y fructíferos para la reflexión. Y quizá lo hace porque, en el fondo de su ser, lo que Kershenbaum busca es cómo detectar vida inteligente fuera de la Tierra, tal y como demuestra su pertenencia al grupo de expertos en comunicación extraterrestre del proyecto METI (Envío de Mensajes a Inteligencia Extraterrestre).

Si algunas de las breves fábulas de Esopo tenían por objeto explicar el origen de algún fenómeno natural, como la existencia de seres voladores sin plumas (caso del murciélago, que sorprendía en la Antigüedad), Kershenbaum realiza también en su *Guía* una progresión etiológica ordenada, evolutiva, de los rasgos definitorios de la vida. No es baladí que empiece dedicando un capítulo al debate forma-función, que sugiere ecos a obras como *La rebelión de las formas* de Jorge Wagensberg (Tusquets, 2004), para progresar indagando en la distinción entre la vida animal y la extraterrestre. Se replantean luego las nociones de movimiento e inteligencia social, esenciales en la complejidad de la vida.

Aunque las elucubraciones sobre civilizaciones alienígenas se vienen dando desde la ruptura del geocentrismo que supuso el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* de Galileo, los múltiples descubrimientos de exoplanetas en los últimos años han destapado la fiebre astrobiológica y han vuelto a poner de moda la célebre paradoja de Fermi: si los extraterrestres existen, ¿dónde están?

Más allá de los cálculos estadísticos de la ecuación de Drake y sus variaciones, aumentar la probabilidad de detectar una señal proveniente de una civilización alienígena implica comprender muy bien las leyes lingüísticas y su base matemática [*véase* «Hacia una teoría matemática de la comunicación», por Antoni Hernández-Fernández; Investigación y Ciencia, abril de 2021], algo que Kershenbaum apunta en dos capítulos dedicados a la información y al lenguaje. Muy consciente de que para entender lo alienígena necesita liberarse de lo humano, Kershenbaum arriesga en los capítulos finales atacando el problema de la inteligencia artificial y el concepto de humanidad; es decir, qué significa ser humano. Todo un reto.

Kershenbaum ha escrito un volumen único y actualizado, divertido pero científicamente serio, que los lectores en español disfrutarán. Complementa perfectamente a obras generalistas anteriores como *Astrobiología: Un puente entre el Big Bang y la vida*, de Bartolo Luque, Fernando Ballesteros, Álvaro Márquez, María González, Aida Agea y Luisa Lara (Akal, 2009); al compendio más técnico que recientemente coordinó Andrea Butturini en *(In)habitabilidad planetaria: Fundamentos de astrogeobiología* (Marcombo, 2020); y también a *Gramáticas extraterrestres*, de Fernando Ballesteros (Publicacions de la Universitat de València, 2008), un libro ameno que trata específicamente la comunicación con civilizaciones interestelares.

Si hay dos características definitorias de la especie humana son el lenguaje y la

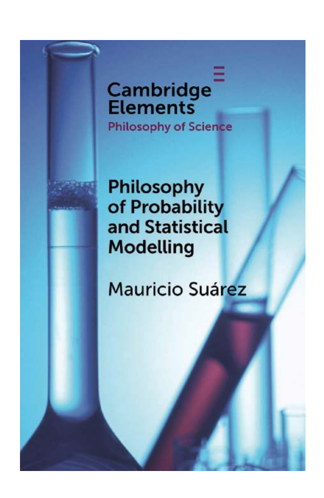
tecnología. La *Guía* de Kershenbaum no puede con todo: se centra en la biología y descarta la tecnología, que menciona solo de pasada. No obstante, ¿no es la tecnología un rasgo esencial para una civilización que pretenda comunicarse a través del cosmos? ¿A los requisitos tecnológicos no se añade la necesidad previa del desarrollo de la ciencia? Las prototecnologías de otros primates, o el uso de elementos naturales como herramientas por parte de córvidos, cetáceos y otras especies distan mucho de la tecnología humana. El salto tecnológico humano se hace evidente con solo mirar a nuestro alrededor. ¿Cómo sería entonces una *Guía del tecnólogo galáctico*? ¿Nos unirá la tecnología a otras civilizaciones, más allá del lenguaje? Un capítulo sobre tecnología en el mundo animal hubiese sido la guinda del pastel de esta fabulosa *Guía*.

Si la ciencia ficción de Poul Anderson en *El avatar* (1978) ya nos había imbuido, por ejemplo, de cómo se sienten y viven un abedul, una oruga, un salmón o un cuervo, las revelaciones del zoológico de Kershenbaum sobrepasan la narrativa fantástica y anidan en la imaginación científica del lector. Estimulan los sueños a la luz de los hallazgos y liberan nuestros sentidos para, al final, descubrir que nosotros también somos capaces de escuchar al cosmos. Lejos y dentro.

Quizás antes de otear la lontananza estelar y de analizar espectrográficamente las señales químicas en las atmósferas de distantes exoplanetas, debamos esforzarnos más en salvaguardar la vida próxima y entender sus reglas. Elucubremos cómo será la vida de otros mundos mientras los observamos con nuestros potentes telescopios. Restemos alerta a las señales que captan los radiotelescopios. Pero preservemos los ecosistemas terrestres que pueden albergar las llaves de la astrobiología y la respuesta a la eterna pregunta de si estamos solos en el universo. En la Tierra no lo estamos.

La selva le ha hablado a Kershenbaum durante muchos años, y él ha tenido la deferencia de traducírnoslo ahora, de manera deliciosa, en esta *Guía*. Aprovechemos el regalo del libro, del árbol del que vino y de nuestro planeta.

—Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña



PHILOSOPHY OF PROBABILITY AND STATISTICAL
Mauricio Suárez
Cambridge University Press, 2021
76 págs.

Filosofía de la probabilidad

De las probabilidades objetivas a los modelos estadísticos de la ciencia

La probabilidad es un elemento familiar en nuestras vidas. Durante los últimos dos años, por mencionar el ejemplo más obvio, cada uno de nosotros hemos pensado en la probabilidad de contraer COVID-19 según el lugar y las condiciones en que nos encontremos. Y desde mucho antes, los juegos de ruleta y cientos de máquinas de azar han generado riqueza para los dueños de los casinos y pérdidas para quienes han perseguido esa remota posibilidad de ganar, por ínfima que sea.

Sin embargo, rara vez nos detenemos a cuestionar si la probabilidad es un hecho en el mundo (una propiedad de las monedas, de las máquinas o del clima; es decir, si la probabilidad es objetiva) o si, por el contrario, se trata de una serie de creencias subjetivas que adscribimos a los fenómenos probabilísticos. El debate sobre la objetividad o subjetividad de la probabilidad ha generado controversias entre los filósofos de la ciencia, y hoy en día existen posturas en ambos sentidos [*véase* «¿Qué es la probabilidad?», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, junio de 2011].

En *Philosophy of probability and statistical modeling*, Mauricio Suárez, catedrático de filosofía de la Universidad Complutense de Madrid, defiende una visión objetiva de la probabilidad en términos de las propensiones que tienen los sistemas probabilísticos; esto es, en términos de las disposiciones de los sistemas azarosos a comportarse de ciertas maneras bajo ciertas circunstancias. Pero, si bien Suárez se decanta por la visión objetiva de la probabilidad, hay un elemento refinado en su postura, ya que no pretende negar que la subjetividad puede «colarse» en el cálculo de probabilidades cuando se hacen modelos en ciencia y se decide qué variables tomar en cuenta y cuáles ignorar.

Podemos entender esto con el ejemplo de la moneda, donde, como explica Suárez, la adscripción de probabilidades no se limita a aplicar el principio de indiferencia, según el cual $P = 1/2$ para cada uno de los lados, algo para lo que nos basta conocer la geometría del objeto. En un modelo estadístico mucho más elaborado, como el que Suárez expone en su libro, la adscripción de probabilidades implica más elementos. Y la razón por la cual la moneda es considerada justa y no sesgada recae en la compleja dinámica del fenómeno completo, donde numerosos parámetros, como el rozamiento del aire o el centro de gravedad del objeto, se han idealizado. Al construir modelos estadísticos, nos dice el autor, los científicos encuentran una forma de representar las probabilidades de los sistemas azarosos eligiendo las variables más relevantes y despreciando las que no les parecen primordiales.

Así, una pregunta que atrapará la atención de los lectores de este libro es la siguiente: ¿es posible construir modelos científicos absolutamente objetivos, o siempre habrá algo de subjetividad en ellos? Mi respuesta, secundando a Suárez, es que la ciencia es una combinación de ambos, mucho más cargada hacia la objetividad que hacia la subjetividad.

No puedo evitar hacer una analogía entre la postura de Suárez respecto a la probabilidad y sus aplicaciones en la modelización estadística, por un lado, y

la postura de Einstein con respecto a la construcción de las teorías físicas, por el otro. En el artículo «Einstein: El ideal de una ciencia sin sujeto» (*Revista de Filosofía*, 1989), Ana Rioja comenta que, si bien Albert Einstein fue famoso en el debate con Niels Bohr por defender que las propiedades de las partículas cuánticas debían ser objetivas, independientes del sujeto que observa, reconocía que solamente podemos captar la realidad física por medios especulativos.

En otros contextos, particularmente en una carta que escribió a su amigo Maurice Solovine en 1952, Einstein reconoció que, cuando se construyen las teorías científicas, hay un «salto» de los hechos observados a los modelos abstractos, en el que desempeñan un papel relevante algunos temas subjetivos. Para Einstein, por ejemplo, era importante que la ciencia estuviera unificada, que fuera coherente, elegante, simple y expresable en la menor cantidad posible de ecuaciones. Y esos temas, reconocía el físico, influyen cuando se decide qué elementos incluir en el modelo. Haciendo un guiño a Feyerabend, diríamos que, entre la inmensa abundancia que provee la experiencia, los científicos seleccionan un pequeño subconjunto de elementos relevantes y con ellos construyen la ciencia. Pero eso de ninguna manera implicará que lo que la ciencia diga sobre el mundo sea arbitrario o personal. En pocas palabras, los sujetos construyen conocimiento científico objetivo.

¿Es posible construir modelos científicos absolutamente objetivos, o siempre habrá algo de subjetividad en ellos?

El libro de Suárez se divide en dos partes. Antes de exponer, en la segunda, su postura con respecto a las probabilidades objetivas y su papel en la modelización estadística, el autor realiza en la primera un recorrido histórico de las diferentes interpretaciones de la probabilidad. Esta primera parte bien podría cumplir con fines didácticos para cursos de máster en filosofía de las ciencias formales. La segunda, en cambio, es una aportación novedosa a los debates más especializados de la filosofía de la probabilidad. En otras palabras, la primera parte de la obra está dirigida a un público mucho más amplio que la segunda.

Una de las aportaciones del libro es que nos enseña que existen dos posturas pluralistas posibles con respecto a las interpretaciones objetivas de la probabilidad. El pluralismo que rechaza el autor se limitaría a aceptar una simple coexistencia entre las distintas formas de interpretar la probabilidad objetiva, mientras que el pluralismo que defiende recurre a una distinción tripartita entre propensiones, probabilidades y frecuencias, donde ninguna de estas nociones puede reducirse a las otras. Las tres partes constituyen el «nexo del azar», y todas son necesarias para la metodología de los modelos estadísticos. Suárez ejemplifica esta propuesta tripartita con un caso de epidemiología que recomiendo leer, pues aclara la diferencia entre propensión, probabilidad y frecuencia, y argumenta que las propensiones constituyen el fundamento de las probabilidades.

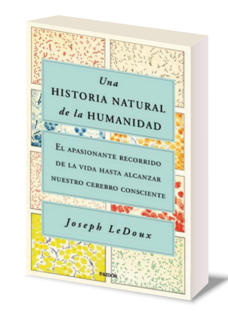
Los lectores de este libro también aprenderán a distinguir entre los modelos meramente probabilísticos y los modelos estadísticos, así como la diferencia entre los sistemas caóticos y aquellos dinámicamente estables, los cuales muestran una mayor estabilidad ante las alteraciones de las condiciones iniciales.

Si tuviera que señalar algún defecto de la obra, sería que no mencione ni una sola vez a Lawrence Sklar. Si bien Suárez nos informa de los enfoques más actuales (Hoefer, Loewer, Emery, Sober, Lyon, Ismael, Skrym) y de algunos ya bien conocidos desde hace décadas (Carnap, Hacking, Suppes, Van Fraassen, etcétera), ha olvidado hacer los honores debidos a Sklar como uno de los clásicos de la filosofía de la probabilidad. Otra cuestión que no se aborda en el libro —y que entiendo que quedaba fuera de sus objetivos, pero que igualmente me gustaría traer a consideración— es si las potencias aristotélicas son en algún sentido parecidas a las propensiones. Después de todo, se trata de todo aquello que podría manifestarse pero que a veces se actualiza, se reifica, ocurre, y a veces no. Sea como fuere, el libro de Suárez constituye una excelente contribución a la literatura existente, que puede servir a fines didácticos propios y que resulta vivamente recomendable.

—Fernanda Samaniego Bañuelos
Facultad de Filosofía y Letras,
Universidad Nacional Autónoma
de México

NOVEDADES

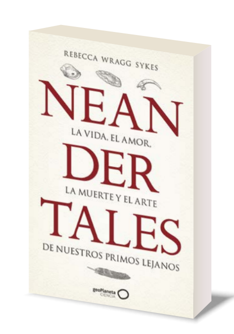
Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



UNA HISTORIA NATURAL DE LA HUMANIDAD
EL APASIONANTE RECORRIDO DE LA VIDA HASTA ALCANZAR NUESTRO CEREBRO CONSCIENTE
Joseph LeDoux
Paidós, 2021
ISBN: 978-84-493-3827-4
472 págs. (24 €)



ENERGÍA Y CIVILIZACIÓN. UNA HISTORIA
Vaclav Smil
Arpa, 2021
ISBN: 978-84-18741-08-1
640 págs. (24,90 €)



NEANDERTALES
LA VIDA, EL AMOR, LA MUERTE Y EL ARTE DE NUESTROS PRIMOS LEJANOS
Rebecca Wragg Sykes
GeoPlaneta, 2021
ISBN: 978-84-08-24655-8
480 págs. (19,95 €)

Recopilación de Mark Fischetti

NOVIEMBRE

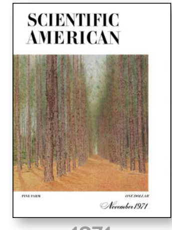
1971

Peces en el valle de la Muerte

«Pequeños manantiales y arroyuelos salpican la región del valle de la Muerte, uno de los más áridos desiertos. Esas pequeñas "islas" acuáticas, algunas no mayores que una bañera, las habitan cuatro especies de unos diminutos peces conocidos como cachorritos del desierto (ciprinodóntidos). Se han identificado más de 20 poblaciones diferenciadas. Cada una de ellas está confinada en un solo oasis aislado. Algunas han sobrevivido durante miles de años en pequeños hábitats, donde el número de individuos nunca rebasó unos pocos centenares. Como resultado de la divergencia evolutiva, las especies poseen formas y marcas distintivas.»

Explosiones nucleares subterráneas

«Desde el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares de 1963, EE.UU. ha realizado 229 pruebas subterráneas, y la URSS al menos 47. Esas pruebas han ayudado a los sismólogos a descubrir cómo distinguir entre las explosiones subterráneas y los terremotos, la espinosa cuestión que en 1963 hizo fracasar desde el principio los intentos por plantear una prohibición total de las pruebas. Un artículo reciente en *Nature* describe un método "que separa por completo una población de [27] explosiones subterráneas en [...] campos de pruebas de una población de [51] seísmos [...] poco profundos [...] dentro de unos 15 grados respecto de esos campos de pruebas". Los 27 ensayos generaban unas señales sísmicas cuyas "ondas de cuerpo" tenían una magnitud de ente 4,2 y 6,2. Las ondas de cuerpo, u ondas P, se propagan por el manto terrestre y pueden registrarse más claramente a distancias de entre 3000 a 10.000 kilómetros del evento que a distancias menores. Resultan así muy adecuadas para detectar eventos clandestinos.»





1971



1921



1871

1921

La selección de ejecutivos por Edison

«Cuando Thomas A. Edison estuvo poniendo a prueba a aspirantes de puestos ejecutivos [en su Laboratorio de Menlo Park, en Nueva Jersey], les presentaba una lista de 150 preguntas, ninguna de las cuales tenía relación directa alguna con el trabajo. Muchos se burlaron de ello. Ha transcurrido suficiente tiempo para que los resultados hayan justificado tan insólito modo de selección. Edison declaró a *Scientific American*: "Me parece a mí que lo primero que debe poseer un ejecutivo es la mejor memoria posible. Desde luego, eso no asegura que una persona de buena memoria sea un buen ejecutivo. Pero si carece de ella le falta la principal cualidad, y lo demás no importa".»

1871

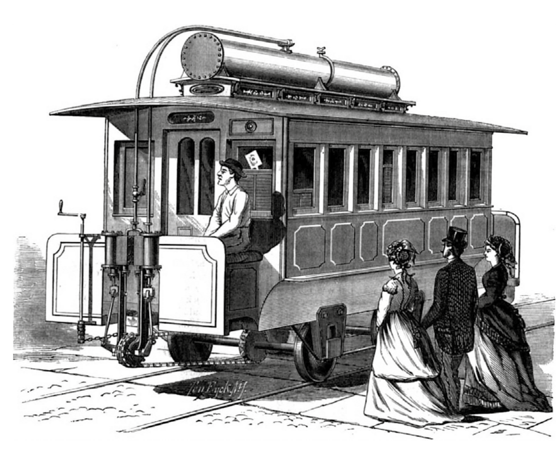
Habla sintética

«La máquina parlante del profesor Faber se halla en Filadelfia. En la demostración de anoche se dijeron frases de seis y ocho palabras en inglés, francés y alemán. La voz suena chillona, monótona y forzada, pero asombrosamente correcta en la mayoría de los casos, y fue recibida con aplausos por el público. La máquina consiste en una mesa dorada bajo la cual se ve un fuelle. Sobre la mesa, una cara inexpresiva fija en uno unos ojos fríos, y debajo hay dispuesta una masa de alambres, cuerdas, delicadas palancas de madera, tubos de goma y conductos. Al comprimir el fuelle se impulsa aire a través de una tráquea de hierro, y de ahí por una glotis artificial, desde la cual atraviesa un respiradero que representa la boca humana, con una mandíbula móvil y una lengua de caucho. Catorce palancas, movidas de forma conjunta, generan el sonido de cualquier sílaba deseada. Una palanca independiente produce una carcajada.»

¿Evita el calor los resfriados?

«Durante siglos, los escalofríos y la fiebre se han atribuido al "miasma", un efluvio de la tierra tan sutil que ni el químico más hábil era capaz de detectarlo. Pero el microscopio ha descubierto una multitud de seres vivos en el aire miasmático. Se duda si esa vida es animal o vegetal, pero resulta de la combinación de calor, humedad y vegetación. Para ser nocivo, ese aire debe inhalarse o ingerirse. Pero el frío lo adensa tanto que cae a tierra y no puede ni inhalarse ni ingerirse. El calor arrastra el miasma hacia las nubes. Como consecuencia, desde una hora tras el alba hasta una hora antes del ocaso, como regla general, el miasma estará demasiado alto por encima de nuestras cabezas para perjudicarnos. Para [estar] a salvo en primavera y en otoño, vístase al calor de una lumbre suave y desayune antes de salir. Vuelva a casa antes del anochecer, cene antes de la puesta del sol, al calor del mismo hogar, luego vaya y haga lo que guste.»

En la década de 1890, la mayoría de los médicos suscribían la teoría microbiana de la enfermedad y habían descartado la idea del miasma, preconizada por Hipócrates en el siglo IV a.C.



1871: Tranvía de amoniaco. Como fuente motriz, teóricamente el amoniaco presenta grandes ventajas frente al vapor. Pero es una sustancia mucho más cara que el agua, y [...] las pequeñas fugas producen corrosiones [...]. El doctor E. Lam, de Nueva Orleans, ha atacado las dificultades prácticas con gran éxito.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXV, N.º 19, 4 DE NOVIEMBRE DE 1871



INFORME ESPECIAL | BIODIVERSIDAD

Manifiesto por la protección de la biodiversidad
Josef Settele

El ocaso de los anfibios
Gunther Köhler

La amenaza de las invasiones biológicas
Montserrat Vilà



ASTRONOMÍA

El telescopio espacial James Webb
Clara Moskowitz

Así será el sucesor del Hubble.

MATEMÁTICAS

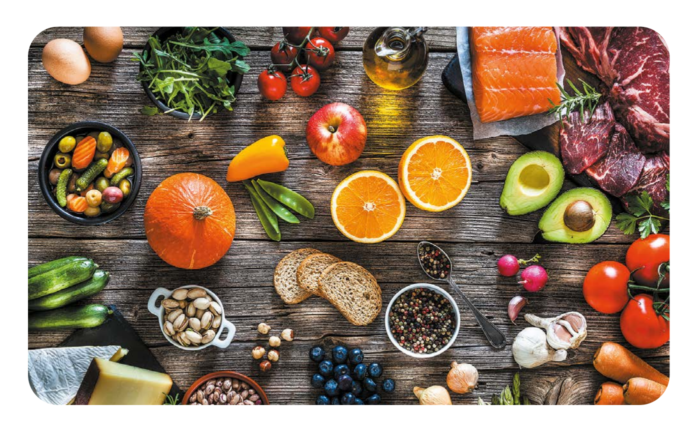
Matemáticas infinitas
Emily Riehl

Varios avances en teoría de categorías están permitiendo conectar entre sí complejos conceptos matemáticos.

SOSTENIBILIDAD

Más comida, menos desperdicios
Chad Frischmann y Mamta Mehra

Reducir las pérdidas en la cadena alimentaria podría aumentar enormemente el suministro y mitigar de manera considerable las emisiones de carbono.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes* y *Regresar a Venus*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Las fascinantes mariposas de cristal*; Debbie Ponchner: *Un experimento halla indicios de un nuevo tipo de energía oscura*; Ignacio Navascués: *El cerebro eléctrico*; Anna Romero: *Un plan para salvar a los pumas*; Miguel A. Vázquez Mozo: *¿Hay que revisar el modelo cosmológico?*; Alfredo Marcos: *Es hora de exigir explicaciones a la inteligencia artificial*; Ana Mozo García: *El cuerpo contra sí mismo, Las enfermedades autoinmunitarias, en cifras, Cómo surge la autoinmunidad* y *En busca de la especificidad*; Lorenzo Gallego: *Traición desde el interior* y *Riesgo femenino*; Ernesto Lozano: *Energía nuclear a pequeña escala*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España